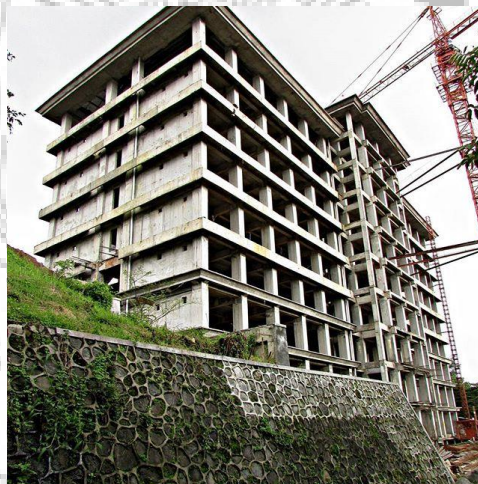


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Umum

Sebelumnya Gedung Kuliah Bersama 4 dibangun dengan menggunakan struktur beton bertulang dengan menggunakan tambahan perkuatan dari *shear wall*. Dengan ketinggian struktur +39.00 meter, Gedung Kuliah Bersama 4 termasuk struktur dengan bangunan tinggi yang dapat direncanakan ulang dengan menggunakan metode *flat slab*. Sistem bangunan *flatslab* mayoritas dijumpai pada struktur rendah yang berisiko rendah untuk angin dan gempa bumi. Tetapi dengan kemajuan teknologi saat ini dengan menggunakan beton dan baja berkualitas, sistem bangunan pelat datar telah banyak diterapkan untuk bangunan bertingkat tinggi.

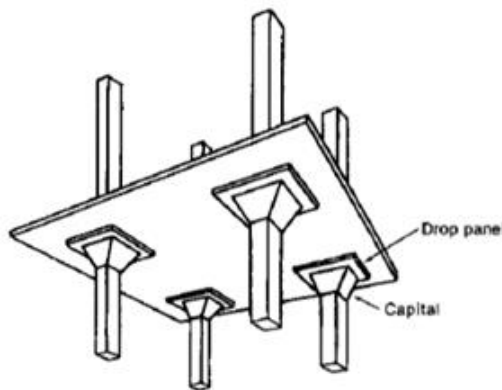


**Gambar 2.1 Gedung Kuliah Bersama 4**

Dalam perencanaan gedung bertingkat tinggi yang tidak menggunakan balok, geser adalah pertimbangan kritis terutama di bagian pertemuan antara pelat dan kolom. Jika bagian pertemuan struktur tidak kuat, kolom penyangga di atas pelat akan mendistribusikan tegangan geser dua arah ke arah pelat ke atas yang akan menghasilkan tegangan geser yang cukup besar di daerah sekitar kolom yang dapat menyebabkan keruntuhan pukulan. Keruntuhan pukulan ditandai dengan terjadinya

retakan pada pelat atau bahkan ditusuk oleh kolom. Kemungkinan antisipasi untuk mengurangi keruntuhan pukulan adalah untuk memberikan penguatan geser yang cukup pada area pertemuan antara pelat dan kolom dengan pemasangan panel jatuh.

Tebal minimum lantai tanpa balok interior yang menghubungkan pendukung dan memiliki rentang resiko yang panjang dalam rentang yang pendek tidak lebih dari dua harus memenuhi persyaratan SNI. Sedangkan tebal drop panel harus sesuai dengan peraturan SNI 02-2847-2013 Pasal 13.2.5. Pada perencanaan ulang Gedung Kuliah Bersama 4 (GKB-4) jarak antar portal yang semula 4,5 meter akan diganti menjadi 9 meter, sehingga persyaratan struktur *flatslab* akan terpenuhi.



Gambar 2.2 Flat slab

Menurut Colin Caprani (2009), *flat Slab* adalah sebuah pelat (dengan atau tanpa *drop panel*) yang ditumpu oleh kolom (dengan atau tanpa pelebaran kepala kolom) dan umumnya tanpa menggunakan balok. Lembaran datar termasuk plat beton dua arah dengan kepala kolom, panel drop, atau keduanya. Flatslab sangat cocok untuk beban berat dan bentang panjang, lempengan datar akan membutuhkan lebih sedikit beton dan penguatan jika dibandingkan dengan struktur bangunan yang menggunakan balok. Dalam struktur pelat datar, transfer beban kolom dilakukan dengan ketebalan pelat dekat kolom menggunakan panel jatuh atau mengembangkan bagian atas kolom yang membentuk modal kolom.

Menurut Chua-Kia Wang dan Charles G. Salmon (1992), *flat Slab* dicirikan oleh tidak adanya balok diluar lantai, mungkin tidak ada. Lantai pelat datar berbeda dari pelat datar dalam hal ini bahwa lantai pelat datar memiliki kekuatan yang cukup dihadapan satu atau kedua hal, yaitu adanya *drop panel* yang merupakan

pertambahan tebal pelat di daerah kolom, dan kepala kolom (*coloum capital*) yaitu perbesaran dari kolom bagian atas pada pertemuan dengan pelat lantai.

## 2.2 Beban Struktur

Sebelum mendesain suatu struktur, perlu diperhatikan tiga hal pokok berikut yaitu bahwa struktur yang akan kita rencanakan harus kuat, tahan lama dan mudah pengerjaannya. Struktur harus kuat maksudnya adalah struktur harus menjamin bahwa:

1. Dibawah pembebanan terburuk konstruksi telah aman.
2. Selama kondisi kerja normal, deformasi dari bagian konstruksi tidak mengurangi bentuk, keawetan dan penampilan dari konstruksi itu sendiri. Sehingga perlu suatu perencanaan yang tidak melebihi control yang diizinkan.

Analisis struktural adalah bagian yang sangat penting dari desain bangunan dan aset lain yang dibangun seperti jembatan dan terowongan, karena beban struktural dapat menyebabkan stres, deformasi dan pemindahan yang dapat mengakibatkan masalah struktural atau bahkan kegagalan. Peraturan bangunan mengharuskan struktur harus dirancang dan dibangun untuk dapat menahan semua jenis beban yang kemungkinan akan mereka hadapi selama siklus hidup mereka.

Beberapa jenis beban yang sering dijumpai adalah mati, hidup, angin, gempa dan terfaktor.

### 2.2.1 Beban Mati

Beban mati, juga dikenal sebagai beban permanen atau statis, adalah yang dominan terkait dengan berat struktur itu sendiri, dan dengan demikian tetap diam dan relatif konstan sepanjang waktu. Beban mati mungkin termasuk berat dari setiap elemen struktur, partisi non-struktural permanen, perlengkapan tidak bergerak seperti eternit, lemari built-in, dan sebagainya.

Beban mati dapat dihitung dengan menilai bobot bahan yang ditentukan dan volumenya seperti yang ditunjukkan pada gambar. Ini berarti bahwa dalam teori,

harus mungkin untuk menghitung beban mati dengan tingkat akurasi yang baik. Namun, insinyur struktural kadang-kadang konservatif dengan perkiraan mereka, meminimalkan potensi defleksi, memungkinkan margin of error dan memungkinkan untuk perubahan dari waktu ke waktu, dan desain beban mati seringkali jauh melebihi yang dialami dalam praktek.

Beban mati dari suatu bangunan merupakan berat sendiri struktur akibat adanya gravitasi bumi. Beban ini hanya bekerja vertikal ke bawah secara terus menerus pada struktur. Perhitungan beban mati suatu struktur didasarkan dari berat satuan material dan berdasarkan volume elemen tersebut. Benda yang menempel pada elemen struktur tersebut juga sebagai beban mati, seperti pipa air, pipa listrik, saluran pendingin dan pemanas ruangan, plafond dan sebagainya.

Sebelum melakukan perenanaan struktur, beban mati dihitung terlebih dahulu dengan menaksir berat elemen struktur dan dimensi struktur. Setelah itu melakukan perhitungan pembebanan sesuai dengan berat elemen dan volume elemen tersebut.

### **2.2.2 Beban Hidup**

Beban hidup, juga dikenal sebagai beban yang dipaksakan, biasanya bersifat sementara, dapat berubah dan dinamis. Ini termasuk beban seperti lalu lintas kendaraan, penumpang, perabotan dan peralatan lainnya. Intensitas beban ini dapat bervariasi tergantung pada waktu, misalnya gedung kantor mungkin mengalami peningkatan beban hidup selama jam kerja hari kerja tetapi beban yang jauh lebih kecil pada malam hari atau pada akhir pekan. Beban hidup dapat terkonsentrasi atau terdistribusi dan mungkin melibatkan benturan, getaran atau akselerasi.

Beberapa beban hidup dapat membebani secara permanen sedang lainnya hanya bekerja sekejap. Karena berat dan kepadatan beban hidup tidak bias diketahui secara pasti, maka besar yang sesungguhnya dari beban ini sulit untuk ditentukan. Oleh karena itu untuk mendapatkan keamanan gedung yang memadai, beban hidup yang digunakan sebagai beban kerja dalam perencanaan ditetapkan oleh peraturan bangunan dari badan pemerintah

### 2.2.3 Beban Angin

Beban angin dapat diterapkan oleh pergerakan udara relatif terhadap struktur, dan analisis mengacu pada pemahaman meteorologi dan aerodinamika serta struktur. Beban angin mungkin tidak menjadi perhatian yang signifikan untuk bangunan kecil, masif, tingkat rendah, tetapi penting dengan ketinggian, penggunaan material yang lebih ringan dan penggunaan bentuk yang mempengaruhi aliran udara, biasanya bentuk atap. Di mana bobot mati suatu struktur tidak cukup untuk menahan beban angin, struktur tambahan dan bahan-bahan pengikat mungkin diperlukan.

### 2.2.4 Beban Gempa

Beban horisontal yang signifikan dapat dikenakan pada struktur selama gempa bumi. Bangunan di area aktivitas seismik perlu dianalisis secara hati-hati dan dirancang untuk memastikan mereka tidak gagal jika gempa bumi terjadi.

Tiga metode yang dapat digunakan untuk memperoleh desain gaya seismik ekuivalen bagi bangunan tinggi:

1. Gaya seismik horizontal  $F_i$  pada setiap lantai dalam koefisien seismik:

$$F_i = k_i \times W_T \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$k_i = f(k_b) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

$$k_b = R_1 \times Z \times S \times K \times I \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

2. Gaya-gaya geser seismik tiap lantai dalam koefisien seismik:

$$Q_i = q_i \sum_i^n W_j \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

$$q_i = f(k_b) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

$$q_b = R_2 \times Z \times S \times K \times I \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

3. Gaya-gaya geser seismik tiap lantai dan geser  $V_b$  dalam koefisien seismik:

$$V_b = (R_2 ZSKI) \sum_1^n W_j \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$F_i = (V_b - F_n) \times \frac{W_i \times h_i}{\sum_1^n W_j \times h_j} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

$$F_n = (0,1 \sim 0,5) V_b \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana:

$F_i$  = Gaya seismik horizontal di lantai i

$F_n$  = Gaya seismik horizontal di lantai atap elevasi n

$Q_i$  = Gaya geser seismik di lantai i

$Q_b$  = Gaya geser seismik di lantai dasar (*base*)

$k_i$  = Koefisien seismik di lantai I sebagai fungsi  $k_b$

$k_b$  = Koefisien seismik di lantai dasar (koefisien geser dasar seismik)

$W_i$  = Berat lantai i =  $q_{DL} + q_{LL}$

j = Indeks lantai sembarang j; n = Jumlah lantai

$R_1$  = Koefisien tanggap gaya geser diperoleh dari tanggap spektrum standar

$R_2$  = Koefisien tanggap geser dasar diperoleh dari tanggap spektrum Standar

Z = Faktor zona

S = Faktor tanah pondasi

I = Faktor kegunaan struktur

K = Faktor tipe struktur untuk menentukan tipe dan redaman atau daktilitas

$h_i$  = Tinggi lantai

Pada cara ketiga :  $C = R_2 Z S$ , sehingga  $V_b = C I K W_t$ ;  $W_t = \sum_1^n W_j$

### 2.2.5 Beban Terfaktor

Faktor beban dikembangkan untuk membantu tingkat keandalan struktur berdasarkan studi probabilistik yang memperhitungkan penyebab yang berasal dari beban, kekambuhan, distribusi dan sifat statis atau dinamis. Faktor beban dapat menyebabkan korosi atau pertumbuhan retak dalam struktur. Tingkat pertumbuhan retak dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan beban. Mereka menyebabkan korosi tumbuh di daerah yang terpapar, di bawah cat, di sekitar pengencang, di antara lapisan pelapis dan di dalam komponen struktural.

Dalam struktur, beban menyebabkan tekanan, deformasi dan pemindahan. Penilaian efeknya dilakukan dengan bantuan faktor beban. Beban berlebih dapat menyebabkan kegagalan struktural, dan karenanya kemungkinan seperti itu harus dipertimbangkan dalam desain. Muatan lebih tinggi dari beban maksimum. Misalnya, dalam mendesain tangga, faktor beban hidup mungkin 1,6/1,2 kali dari beban maksimum yang diharapkan. Kedua "beban berfaktor" ini digabungkan (ditambahkan) untuk menentukan "kekuatan yang dibutuhkan" dari tangga.

**Tabel 2.1 Faktor reduksi kekuatan**

No	Gaya	$\phi$
1	Lentur tanpa beban aksial	0,08
2	Geser dan torsi	0,75
3	Beban aksial dan beban aksial dengan lentur	0,80
4	Aksial tarik dan aksial tarik dengan lentur	0,80
5	Aksial tekan dan aksial tekan dengan lentur (spiral)	0,70
6	Tumpuan pada beton	0,65

Sumber: SNI 2847-2013

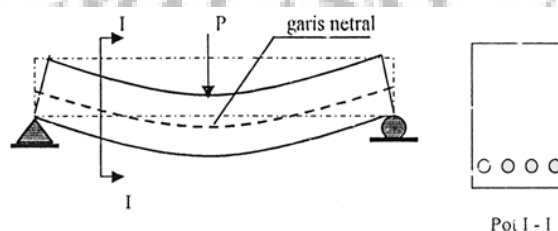
### 2.3 Beton Bertulang

Menurut Nawi (1990)

beton sederhana dibentuk oleh pengerasan semen, udara, dan campuran agregat halus, agregat kasar (hancur atau kerikil), udara, dan kadang-kadang campuran tambahan lainnya. Bahan-bahan yang dapat digunakan untuk penelitian dicampur untuk mempercepat reaksi hidrasi dari campuran semen, yang menyebabkan pengerasan beton. Bahan yang terbentuk ini memiliki kekuatan tekan yang tinggi, dan kekuatan tarik, atau kira-kira kekuatan tariknya 0,1 kali kekuatan untuk menekan. Dengan demikian, tarik tarik dan geser harus diterapkan ke daerah tarik penampang untuk mengatasi kelemahan di daerah tarik dari elemen beton bertulang.

Menurut Amrinsyah Nasutiion (2009) Sistem konstruksi yang dibangun dengan menggunakan system beton bertulang, seperti bangunan, jembatan, dinding penahan, terowongan, tangki, saluran udara, dll., alat desain dasar dan penelitian beton bertulang sesuai dengan gaya aksial, momen lentur, gaya geser, mpmen torsional, atau kombinasi dari gaya gaya batin. Prinsip-prinsip dasar struktur ini digunakan untuk gaya aksial, momen lentur, gaya geser, dan gaya lainnya, di samping konfigurasi rentang dan dimensi setiap elemen.

Misalnya, fungsi beton dan baja tulangan ditunjukkan pada Gambar 2.3, yang merupakan blok sederhana pada dua tiang.



**Gambar 2.3 Balok menerus**

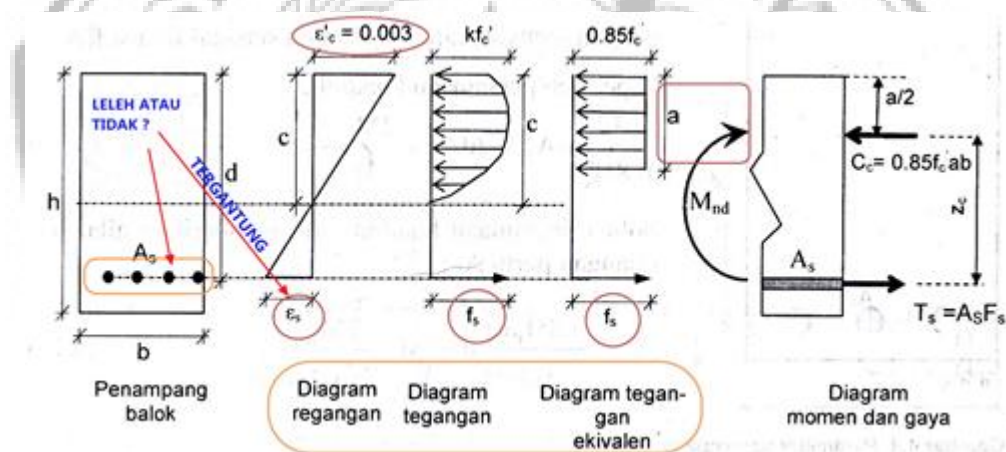
Dari gambar di atas menunjukkan bahwa karena beban  $P$  yang bekerja pada balok balok akan fleksibel sehingga bagian atas garis netral dari penampang melengkung tertekan dan bagian bawah penampang garis netral tertarik. Fungsi



beton adalah menahan gaya tekan yang terjadi di atas garis netral, sementara tulangan baja diperlukan untuk menahan gaya tarik yang terjadi di bawah garis netral pada balok beton bertulang.

Baja dan beton dapat bekerja sama atas dasar beberapa alasan :

1. Terjadinya ikatan (ikatan, atau interaksi antara batang penguat dan beton keras di sekitarnya) mencegah slip dari baja relatif terhadap beton.
2. Beton memiliki sifat kedap air, sehingga mencegah korosi baja tulangan.
3. Perkiraan kecepatan tingkat ekspansi antara beton dan baja adalah dari 0,0000010 hingga 0,000013 untuk beton dan 0,000012 untuk baja per derajat celcius (°) sehingga tegangan antara beton dan baja karena perubahan suhu dapat diabaikan.



Gambar 2.4 Diagram tegangan regangan balok beton bertulang

Retakan rambut melintang pada tarikan dekat tulangan baja tarik dalam batas tertentu masih diperbolehkan. Ini karena beton tidak kuat menahan tarikan. Selama beban retak masih di bawah lebar retak yang diijinkan, retakan tidak mempengaruhi kekuatan struktur.

### 2.3.1 Faktor Reduksi Kekuatan

Kuat nominal dari suatu komponen struktur yang dihitung berdasarkan kaidah-kaidah yang berlaku, harus dikalikan dengan faktor reduksi kurang dari satu. Hasil kali antara kuat nominal dengan faktor reduksi disebut dengan istilah kuat

rencana. Penggunaan faktor reduksi dilakukan dengan mengingat beberapa hal berikut:

1. Untuk mengantisipasi segala ketidakpastian dari kuat nominal penampang akibat dimensi material, serta ketidakakuratan persamaan-persamaan dalam perencanaan.
2. Untuk merefleksikan tingkat daktilitas dan keandalan komponen struktur akibat efek yang ditimbulkan oleh beban kerja.
3. Untuk merefleksikan tingkat kepentingan suatu komponen struktur.

Dalam SNI 2847:2013 Pasal 9.3 digunakan beberapa nilai faktor reduksi kekuatan,  $\phi$ , sebagai berikut:

Untuk penampang terkendali tarik  $\phi = 0.90$

Untuk penampang terkendali tekan

a. Dengan tulangan spiral  $\phi = 0.75$

b. Tulangan non-spiral  $\phi = 0.65$

Untuk geser dan puntir  $\phi = 0.75$

Untuk tumpu pada beton  $\phi = 0.65$

### 2.3.2 Distribusi Tegangan Tekan Ekuivalen

Hubungan antara tegangan dan regangan tekan beton dapat dihitung berdasarkan kurva pengujian tegangan-regangan, atau dapat diasumsikan berbentuk persegi empat, trapesium, parabola, atau bentuk lain yang dapat merepresentasikan kuat lentur penampang. Guna penyederhanaan dalam analisis maupun desain penampang beton, maka dalam SNI 2847:2013 Pasal 10.2.7, diizinkan untuk menggunakan distribusi blok tegangan ekuivalen berbentuk empat persegi panjang untuk perhitungan kuat lentur nominal. Model blok tegangan tersebut sering juga dikenal sebagai blok tegangan Whitney, yang pertama kali diperkenalkan dalam jurnal ACI tahun 1937. Blok tegangan tersebut didefinisikan sebagai berikut:

1. Tegangan tekan merata sebesar  $0,85f'_c$  diasumsikan terdistribusi merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepu penampang dan suatu garis lurus yang sejajar sumbu netral sejarak  $a = \beta_1 c$  dari serat beton yang mengalami regangan tekan maksimum.
2. Jarak  $c$  dari serat dengan regangan tekan maksimum ke sumbu netral harus diukur tegak lurus sumbu tersebut.
3. Faktor  $\beta_1$  dapat dihitung sebagai berikut:
  - a. Untuk kuat tekan beton,  $f'_c$  kurang atau sama dengan 28Mpa

$$\beta_1 = 0.85 \quad \dots \dots \dots (2.9)$$

- b. Untuk  $28\text{Mpa} < f'_c < 56\text{ Mpa}$

$$\beta_1 = 0.85 - 0.05 \frac{f'_c - 28}{7} \quad \dots \dots \dots (2.10)$$

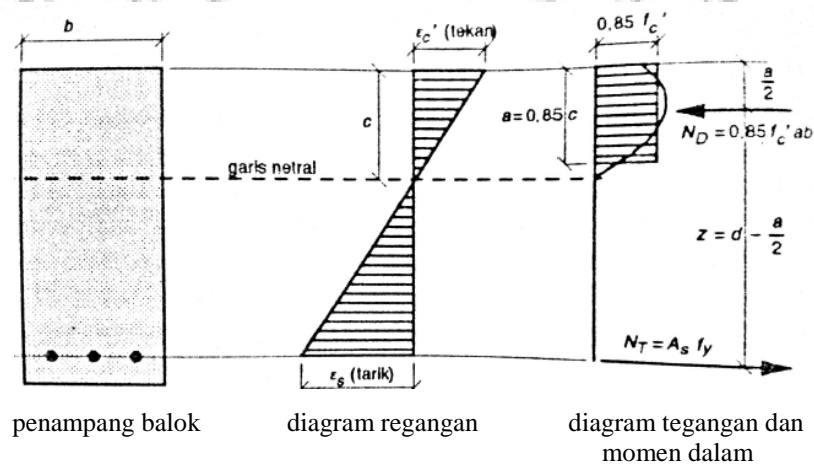
- c. Untuk  $f'_c$  lebih dari 56 Mpa

$$\beta_1 = 0.65 \quad \dots \dots \dots (2.11)$$

Untuk suatu daerah tekan persegi dengan lebar  $b$  dan tinggi sumbu netral  $c$  maka resultan gaya tekan yang terjadi adalah:

$$C = 0.85 f'_c b \beta_1 c = 0.85 \beta_1 f'_c b c \quad \dots \dots \dots (2.12)$$

### 2.3.3 Penampang Persegi Bertulangan Tunggal



Gambar 2.5 Penampang persegi pada kondisi seimbang

Dari diagram regangan diatas maka dengan menggunakan perbandingan akan diperoleh hubungan berikut:

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0.003}{0.003 + \frac{f_y}{E_s}}, \text{ atau jika } E_s \text{ diambil sebesar } 200.000 \text{ Mpa, maka:}$$

$$c_b = \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) d \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan kesetimbangan gaya, maka dapat dituliskan:

$$C = T$$

$$0.85 f'_c a_b b = A_{sb} f_y \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$a_b = \frac{A_{sb} \times f_y}{0.85 f'_c b} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

Persentase tulangan yang dibutuhkan untuk menghasilkan kondisi seimbang disebut sebagai rasio tulangan seimbang,  $\rho_b$ . Nilai  $\rho_b$  sama dengan luas tulangan baja dibagi dengan luas penampang efektif:

$$\rho_b = \frac{A_{sb}}{b \times d} \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

Dengan:

$b$  = lebar penampang yang tertekan

$d$  = jarak dari serat tekan terluar ke titik berat tulangan baja tarik

Persamaan diatas disubstitusikan, maka:

$$0.85 f'_c a_b b = f_y \rho_b b d, \text{ atau}$$

$$\rho_b = \frac{0,85 f_c'}{d \times f_y} a_b = \frac{0,85 f_c'}{d \times f_y} \beta_1 \times c_b \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

Selanjutnya substitusikan nilai  $c_b$  untuk mendapatkan persamaan umum rasio tulangan seimbang,  $\rho_b$ :

$$\rho_b = 0,85 \times \beta_1 \frac{f_c'}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

Secara umum, momen nominal dari suatu balok persegi bertulangan tunggal dihitung dengan mengalikan nilai  $C$  atau  $T$ .

$$M_n = 0,85 f_c' . a . b \left( d - \frac{a}{2} \right) = A_s . f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

Untuk mendapatkan besarnya kuat rencana,  $\phi M_n$ , maka kuat momen nominal,  $\phi M_n$ , harus direduksi dengan cara dikalikan dengan faktor reduksi  $\phi$ :

$$\phi M_n = \phi A_s f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) = \phi A_s f_y \left( d - \frac{A_s \times f_y}{1,7 f_c' \times b} \right) \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

Pada regangan penampang pada kondisi seimbang diperoleh:

$$c_b = \frac{a_b}{\beta_1} = \frac{A_{sb} \times f_y}{0,85 f_c' \beta_1 b} = \frac{\rho_b f_y d}{0,85 f_c' \beta_1} \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Maka diperoleh pula:

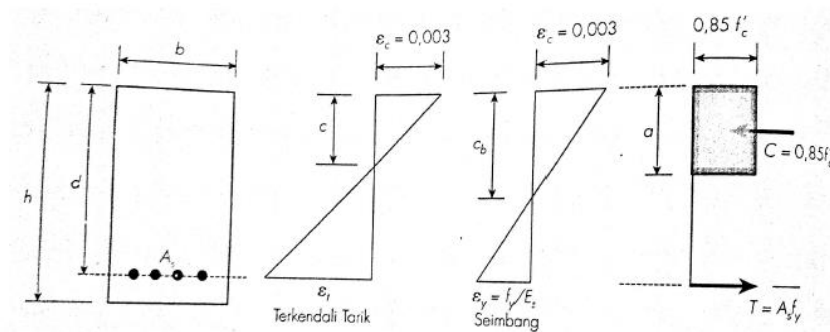
$$c = \frac{\rho_b \times f_y d}{0,85 f_c' \beta_1} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

Dari kedua persamaan tersebut dapat dinyatakan perbandingan antara  $c$  dan  $c_b$ :

$$\frac{c}{c_b} = \frac{\rho}{\rho_b} \quad \dots\dots\dots (2.23)$$

Apabila kedua ruas dibagi dengan  $d$ , maka diperoleh:

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \frac{c_b}{d} \dots\dots\dots (2.24)$$



penampang balok

diagram regangan

diagram tegangan dan  
momen dalam

**Gambar 2.6 Penampang seimbang dan penampang terkendali tarik**

Dari gambar 2.6 dengan menggunakan perbandingan segitiga, didapatkan persamaan:

$$\frac{c}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \varepsilon_t} \dots\dots\dots (2.25)$$

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \dots\dots\dots (2.26)$$

Selanjutnya dari persamaan 2.18 dan 2.20, dan substitusikan persamaan 3.24 ke dalam persamaan 2.26:

$$\frac{c}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \frac{c_b}{d} = \frac{\rho}{\rho_b} \left( \frac{0,003}{0,003 + \frac{f_y}{E_s}} \right) \dots\dots\dots (2.27)$$

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + \frac{f_y}{E_s}}{0,003 + \varepsilon_t} \dots\dots\dots (2.28)$$

Dalam hal desain balok atau komponen struktur lentur lainnya, batas maksimum tasio tulangan dapat diambil dengan menggunakan nilai  $\varepsilon_t = 0,005$ , sehingga dari persamaan 2.28 dapat dirumuskan:

$$\rho_{maks} = \left( \frac{0,0003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \rho_b \quad \dots\dots\dots (2.29)$$

Jika tulangan baja mempunyai  $f_y = 400$  MPa dan  $E_s = 200.000$  Mpa, maka  $\rho_{maks} = 0,625\rho_b$ . Dengan menggunakan batasan tersebut, maka penampang akan dikategorikan sebagai penampang terkendali tarik, dan nilai faktor reduksi  $\phi$  dapat diambil sebesar 0,9. Sedangkan balok atau komponen struktur dengan  $\rho > \rho_{maks}$ , akan menghasilkan  $\varepsilon_t$  yang kurang dari 0,005. Pasal 10.3 dari SNI 2847:2013 mensyaratkan nilai  $\varepsilon_t$  tidak boleh kurang dari 0,004, untuk menjamin tingkat daktilitas serta memperlihatkan tanda-tanda yang nampak secara visual sebelum terjadi keruntuhan. Bila nilai  $\varepsilon_t$  diambil sebesar 0,004, maka persamaan 2.28 menjadi:

$$\frac{\rho}{\rho_b} = \frac{0,003 + f_y / E_s}{0,007} \quad \dots\dots\dots (2.30)$$

Untuk  $f_y = 400$  Mpa dan  $E_s = 200.000$  Mpa, maka  $\rho_{maks} = 0,714\rho_b$ . Namun faktor  $\phi$ , tidak dapat diambil sebesar 0,9, karena penampang berada pada daerah transisi, untuk penampang dengan tulangan non spiral, maka nilai  $\phi$  pada daerah transisi adalah sebesar:

$$\phi_t = 0,65 + (\varepsilon_t - 0,002)(250/3) = 0,65 + (0,004 - 0,002)(250/3) = 0,817$$

#### 2.3.4 Penampang Persegi Bertulangan Rangkap

Terkadang suatu penampang balok beton bertulang didesain memiliki tulangan tarik dan tulangan tekan. Balok demikian dinamakan balok bertulangan

rangkap. Penggunaan tulangan tekan sering dijumpai pada daerah momen negatif dari suatu balok menerus atau di tengah bentang dari suatu balok yang cukup panjang dan memikul beban yang berat serta persyaratan kontrol lendutan cukup ketat. Atau juga sering dijumpai pada kasus dimana tinggi balok sangat dibatasi untuk mengakomodasi kebutuhan arsitektural.

Namun demikian ada empat keuntungan yang diperoleh dengan menambahkan tulangan tekan pada penampang balok beton bertulang, yaitu:

1. Mengurangi lendutan jangka panjang.
2. Meningkatkan daktilitas.
3. Menghasilkan kebutuhan tarik pada struktur.
4. Memudahkan dalam fabrikasi.

#### 2.3.4.1 Tulangan Tekan Sudah Luluh

Momen internal balok bertulangan rangkap dapat dibedakan menjadi dua macam seperti ditunjukkan dalam gambar 2.8.  $M_{u1}$  adalah momen internal yang dihasilkan dari gaya tekan pada beton dan gaya tarik ekuivalen pada tulangan baja,  $A_{s1}$ . Sedangkan  $M_{u2}$  merupakan momen internal tambahan yang diperoleh dari gaya tekan pada tulangan tekan  $A_{s'}$  dan gaya tarik pada tulangan tarik tambahan  $A_{s2}$ .

Momen  $M_{u1}$  merupakan momen yang diperoleh dari balok bertulangan tunggal sebagai berikut:

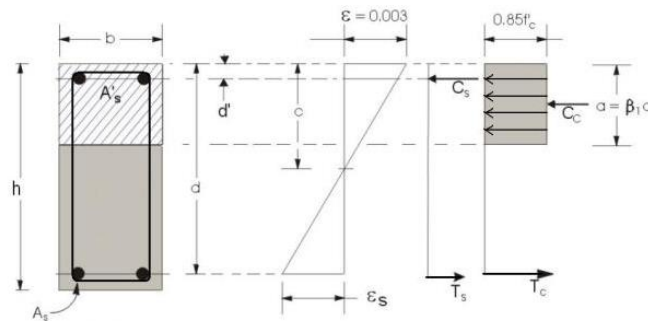
$$T_1 = C_c$$

$$A_{s1}f_y = 0,85f'_c b$$

$$a = \frac{A_{s1}f_y}{0,85f'_c b} \dots\dots\dots (2.31)$$

$$M_{u1} = \phi A_{s1}f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (2.32)$$





Gambar 2.7 Penampang persegi dengan tulangan rangkap dan diagram regangan

Syarat batasan tulangan untuk  $A_{s1}$ , adalah bahwa harus dipenuhi  $\rho_1 (= A_{s1}/bd) < \rho_{maks}$  untuk penampang terkendali tarik dari balok bertulangan tunggal, seperti dituliskan dalam persamaan 2.29. selanjutnya  $M_{u2}$  dapat dihitung dengan mengasumsikan tulangan tekan,  $A_s'$  sudah luluh:

$$M_{u2} = \phi A_{s2} f_y (d - d') = \phi A_s' f_y (d - d') \quad \dots\dots\dots (2.33)$$

Dalam hal ini  $A_{s2} = A_s'$ , menghasilkan gaya yang sama besar namun berlawanan arah seperti ditunjukan pada gambar 2.8. dan akhirnya momen nominal total dari suatu balok bertulangan rangkap diperoleh dengan menjumlahkan  $M_{u1}$  dan  $M_{u2}$ :

$$\phi M_n = M_{u1} + M_{u2} = \phi \left[ A_{s1} f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A_s' f_y (d - d') \right] \quad \dots\dots\dots (2.34)$$

Luas total tulangan baja tarik yang digunakan adalah jumlah dari  $A_{s1}$  dan  $A_{s2}$ , sehingga:

$$A_s = A_{s1} + A_{s2} = A_{s1} + A_s' \quad \dots\dots\dots (2.35)$$

$$A_{s1} = A_s - A_s' \quad \dots\dots\dots (2.36)$$

Selanjutnya persamaan 2.31 dan 2.34 dapat dituliskan:

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_c' b} \quad \dots\dots\dots (2.37)$$

$$\phi M_n = M_{u1} + M_{u2} = \phi \left[ (A_s - A'_s) f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) + A'_s f_y (d - d') \right] \dots (2.38)$$

Serta diperoleh pula syarat batas maksimum rasio tulangan:

$$(\rho - \rho') < \rho_{maks} = \rho_b \left( \frac{0,003 + f_y / E_s}{0,008} \right) \dots (2.39)$$

Dalam analisis yang sudah dilakukan, digunakan asumsi bahwa tulangan tekan sudah luluh. Dari gambar 2.8, apabila tulangan tekan sudah luluh maka dipenuhi:

$$\epsilon'_s \geq \epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} \dots (2.40)$$

Dari kesamaan segitiga di atas sumbu netral, serta dengan menggunakan  $E_s = 200.000 \text{ Mpa}$ , maka:

$$\frac{c}{d'} = \frac{0,003}{0,003 - \frac{f_y}{E_s}} = \frac{600}{600 - f_y}, \text{ atau}$$

$$c = \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) d' \dots (2.41)$$

Mengingat bahwa:

$$A_{s1} f_y = 0,85 f'_c ab$$

Serta

$$A_{s1} = A_s - A'_s \text{ dan } \rho_1 = (\rho - \rho')$$

Maka dapat diperoleh hubungan berikut:

$$(\rho - \rho') b d f_y = 0,85 f'_c ab, \text{ atau}$$

$$(\rho - \rho') = 0,85 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{a}{b} \right) \dots\dots\dots (2.42)$$

Dengan mengingat pula hubungan  $a = \beta_1 c$ , serta dari persamaan 2.41, maka diperoleh:

$$a = \beta_1 c = \beta_1 \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) d' \dots\dots\dots (2.43)$$

Maka persamaan 2.43 dapat dituliskan kembali menjadi:

$$(\rho - \rho') = 0,85 \beta_1 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{d'}{d} \right) \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) = K \dots\dots\dots (2.44)$$

Selain itu persamaan 2.44 dapat diturunkan suatu syarat pemeriksaan apakah tulangan tekan sudah luluh atau belum, yaitu:

$$(\rho - \rho') \geq 0,85 \beta_1 \left( \frac{f'_c}{f_y} \right) \left( \frac{d'}{d} \right) \left( \frac{600}{600 - f_y} \right) = K$$

#### 2.3.4.2 Tulangan Tekan Belum Luluh

Dengan memperhitungkan luas beton yang ditempati oleh tulangan baja, maka dapat dituliskan rumusan untuk besarnya gaya tekan pada tulangan,  $C_s$ , dan gaya tekan pada beton,  $C_c$ , sebagai berikut:

$$C_s = A_s' (f'_s - 0,85 f'_c) = A_s' \left[ 600 \left( \frac{c - d'}{c} \right) - 0,85 f'_c \right]$$

$$C_c = 0,85 f'_c \beta_1 c b$$

Karena  $T = A_s f_y = C_s + C_c$ , maka:

$$A_s f_y = 0,85 f'_c \beta_1 c b + A_s' \left[ 600 \left( \frac{c - d'}{c} \right) - 0,85 f'_c \right]$$

Apabila diturunkan kembali, maka persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk:

$$(0,85f'_c\beta_1b)c^2 + [(600A'_s) - (0,85f'_cA'_s) - A_s f_y]c - 600A'_s d' = 0 \dots (2.45)$$

Persamaan diatas identik dengan persamaan berikut:

$$K_1 c^2 + K_2 c + K_3 = 0 \dots (2.46)$$

Dengan

$$K_1 = 0,85f'_c\beta_1b$$

$$K_2 = A'_s(600 - 0,85f'_c) - A_s f_y$$

$$K_3 = -600A'_s d'$$

Nilai  $c$  dalam Persamaan 2.46 dapat dihitung dengan rumus ABC sederhana. Dengan diketahuinya  $c$ ,  $f'_c$ ,  $a$ ,  $C_c$ , dan  $C_s$  dapat dihitung, demikian pula dengan kuat momen rencana penampang:

$$\phi M_n = \phi \left[ C_c \left( d - \frac{a}{2} \right) + C_s (d - d') \right] \dots (2.47)$$

Bila tulangan tekan belum luluh,  $f'_s < f_y$ , maka luas total tulangan tarik yang dibutuhkan untuk suatu penampang persegi adalah:

$$\text{Maks } A_s = \rho_{maks} bd + A'_s \frac{f'_s}{f_y} = bd \left( \rho_{maks} + \frac{\rho'_s f'_s}{f_y} \right) \dots (2.48)$$

Atau jika dinyatakan dalam rasio tulangan, maka persamaan 2.48 dapat dibagi dengan  $bd$ :

$$\text{Maks } \rho = \text{Maks } A_s / bd \leq \rho_{maks} + \frac{\rho'_s f'_s}{f_y}, \text{ atau}$$

$$\left( \rho - \rho' \frac{f_s'}{f_y} \right) < \rho_{maks} \quad \dots\dots\dots (2.49)$$

## 2.4 Pelat

Didalam konstruksi beton bertulang pelat dipakai untuk mendapatkan permukaan datar. Jika nilai perbandingan antara panjang dan lebar lebih dari 2, gunakan 1 way slab. Jika nilai rasio antara panjang dan lebar pelat tidak lebih dari 2, digunakan slab dua arah (winter, 1993).

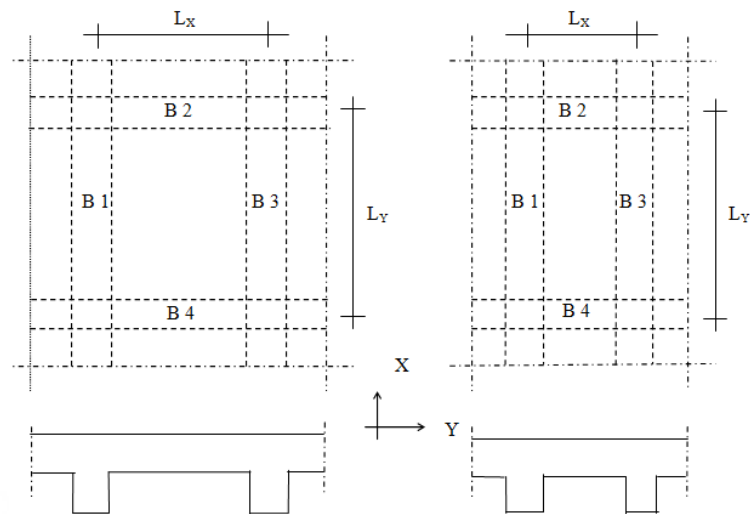
Jika struktur pelat rasio rentang panjang dengan lebar kurang dari 3, maka akan dibelokkan di kedua arah sumbu. Beban pelat ditanggung oleh kedua arah oleh balok pendukung di sekitar panel pelat, sehingga pelat akan melengkung ke dua arah. Dengan sendirinya juga penguatan untuk pelat harus menyesuaikan. Jika panjang pelat sama dengan lebar, perilaku dari empat balok di dukungan pelat akan sama. Sedangkan jika panjangnya tidak sama dengan lebar, sinar yang lebih panjang akan membawa beban yang lebih besar daripada balok pendek (penguat satu arah).

### 2.4.1 Pelat Satu Arah

Jika sistem pelat hanya ditumpu di kedua sisinya, maka pelat tersebut akan melentur atau mengalami lendutan dalam arah tegak lurus dari sisi tumpuan. Beban akan didistribusikan oleh pelat dalam satu arah saja yaitu arah tumpuan. Pelat jenis ini disebut juga dengan pelat satu arah. Apabila pelat tertumpu di keempat sisinya, dan rasio bentang panjang terhadap bentang pendek lebih besar atau sama dengan 2, maka hampir 95% beban akan dilimpahkan dalam arah bentang pendek, dan pelat akan menjadi sistem pelat satu arah. Sistem pelat satu arah cocok digunakan pada bentangan 3-6 meter, dengan beban hidup sebesar 2,5-5 kN/m<sup>2</sup>.

### 2.4.2 Pelat Dua Arah

Struktur gedung beton bertulang dengan sistem cetak ditempat dapat terdiri dari pelat lantai menerus yang dicetak menjadi satu kesatuan monolit dengan balok-balok penopangnya. Pelat merupakan elemen horizontal yang beban hidup dan beban mati dialirkan ke balok dan kolom pada struktur.



**Gambar 2.8 Pelat satu arah dan pelat dua arah**

SNI 2847-2013 memberikan persyaratan pelat yang tidak menggunakan balok dalam yang terletak diantara tumpuan dimana balok itu mempunyai rasio tidak lebih dari 2 antara bentang pendek dan bentang panjang, dan ketebalan minimum balok tersebut harus memenuhi ketentuan berikut:

**Tabel 2.2 Tebal minimum pelat tanpa balok interior**

Tegangan Leleh, $f_y$ MPa	Tanpa Penebalan			Dengan Penebalan		
	Panel Eksterior		Panel Interior	Panel Eksterior		Panel Interior
	Tanpa Balok Pinggir	Dengan Balok Pinggir		Tanpa Balok Pinggir	Dengan Balok Pinggir	
280	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/36$	$l_n/40$	$l_n/40$
420	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/33$	$l_n/36$	$l_n/36$
520	$l_n/28$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/31$	$l_n/34$	$l_n/34$

**Sumber: SNI 2847-2013**

Pelat dengan balok yang membentang antara tumpuan di semua sisi, minimum minimum,  $h$ , harus memenuhi persyaratan berikut:

1. Untuk yang sama atau kurang dari 0,2 harus menggunakan tabel 2.1.

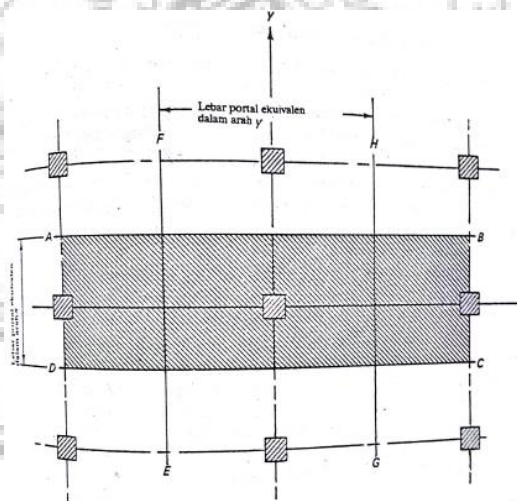
2. Untuk lebih kecil dari 0,2 tetapi tidak lebih dari 2,0,  $h$  tidak boleh kurang dari:

$$\frac{h}{l} = \frac{\ln\left(0,8 + \frac{f_y}{1400}\right)}{36 + 5\beta(\alpha m - 0,2)} \dots\dots\dots (2.50)$$

3. Untuk lebih besar dari 2,0, pelat tebal minimum harus tidak kurang dari:

$$\frac{h}{l} = \frac{\ln\left(\frac{8}{10} + \frac{f_y}{14 \times 100}\right)}{9 \times 4 + 9\beta} \dots\dots\dots (2.51)$$

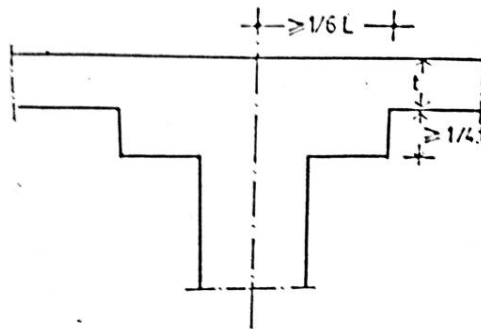
Metode dasar di dalam perencanaan sistem pelat dua arah mencakup khayalan atas pemotongan vertikal dari seluruh bangunan sepanjang garis tengah antara kolom-kolom. Pemotongan menghasilkan beberapa portal yang melebar diantara garis-garis tengah dari dua panel yang berdekatan seperti gambar 2.9.



**Gambar 2.9 Denah portal ekuivalen (daerah x diarsir). Sumber: Nawi, 1990**

Menurut Wang (1985), suatu portal dicirikan terdiri dari: (1). Kolom-kolom diatas dan bawah lantai, dan (2). Sistem lantai dengan atau tanpa balok-balok yang secara lateral dibatasi diantara garis-garis dari dua panel (satu panel untuk barisan kolom-kolom luar) yang berdekatan dengan garis kolom-kolom. Lajur kolom merupakan jenis lajur pada pelat yang memiliki lebar 0,25 dikali  $l_2$  atau 0,25 dikali

$l_1$ , dimana  $l_1$  lebih kecil. Selain lajur kolom terdapat pula laju tengah, dimana lajur tengah diapit oleh lajur kolom. Menurut Soedarmoko (1996), untuk pelat tanpa balok, tetapi dengan penebalan menjorok dalam setiap arah dari pusat alas kurang dari seperenam jarak dari alas dan di depan pelat, setidaknya seperempat pelat panel jatuh.



**Gambar 2.10 Persyaratan penebalan pelat pada pelat tanpa balok**

Pada pinggiran yang tidak menerus boleh disediakan suatu balok pinggir boleh jadi tidak dengan suatu resiko kekakuan  $\alpha$  tidak kurang dari 0,80, atau pada bagian panel dengan tepi yang tidak berkesinambungan.

#### **2.4.3 Metode Desain Langsung (*Direct Design Method*)**

Metode ini merupakan rangkuman dari pendekatan *ACI* untuk mengevaluasi dan mendistribusikan momen total pada panel *slab* dua arah.

Berikut ini adalah batasan penggunaan metode desain langsung.

1. Harus ada setidaknya tiga bentang terus menerus di setiap arah. Jika panel lebih sedikit, momen negatif interior cenderung terlalu kecil.
2. Panel harus persegi panjang dan rasio span lebih panjang / lebih pendek di dalam panel tidak boleh melebihi 2, jika tidak, tindakan satu arah akan berlaku.
3. Di setiap arah, panjang rentang yang berurutan tidak boleh berbeda lebih dari sepertiga dari panjang bentang terbesar.
4. Kolom offset lebih dari 10% dari sumbu antara garis tengah kolom berurutan tidak diizinkan.



5. Metode ini berlaku untuk lempengan yang dikenakan beban gravitasi saja.
6. Beban hidup layanan tidak berfaktor tidak boleh lebih dari dua kali beban mati tidak terpakai.
7. balok digunakan, kekakuan relatif balok antara dua arah vertikal antara 0,2-0,5.

#### 2.4.3.1 Momen Statis Terfaktor Total Untuk Suatu Bentang

Nilai momen terfaktor yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$M_o = \frac{qul^2 \ln^2}{8} \dots\dots\dots (2.52)$$

Dimana  $l_n$  adalah bentang bersih dalam arah momen-momen tersebut ditentukan.

#### 2.4.3.2 Momen Terfaktor Negatif dan Positif

Momen terfaktor negatif harus terletak pada muka tumpuan persegi. Pendukung bulat atau berbentuk polygon harus diperlakukan sebagai tumpuan bujursangkar dengan luas yang sama.

Pada bentang interior, momen statis total,  $M_o$  harus didistribusikan sebagai berikut:

Momen terfaktor negatif ..... 0,65

Momen terfaktor positif ..... 0,35

Pada bentang ujung, momen statis terfaktor total  $M_o$ , harus didistribusikan sebagai berikut:

**Tabel 2.3 Distribusi momen total terfaktor**

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Tepi eksterior tak-tertekang	Slab dengan balok diantara semua tumpuan	Slab tanpa balok diantara tumpuan interior		Tepi eksterior terkekang penuh
			Tanpa balok tepi	Dengan balok tepi	
Momen terfaktor	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65

negatif interior					
Momen terfaktor positif	0,63	0,57	0,52	0,50	0,35
Momen terfaktor negatif eksterior	0	0,16	0,26	0,30	0,65

Sumber: SNI 03-2847-2013

#### 2.4.3.3 Momen Terfaktor pada Lajur Kolom

Lajur kolom harus mampu menahan persentase beban yang tercantum pada tabel berikut, yang mana persentase tersebut merupakan persentase dari momen negatif interior:

**Tabel 2.4 Persen momen terfaktor negatif interior**

$l_2/l_1$	0,5	1,0	2,0
$(\alpha l_2/l_1) = 0$	75	75	75
$(\alpha l_2/l_1) \geq 1,0$	90	75	45

Sumber: SNI 03-2847-2013

Jika nilai input tidak tertera dalam tabel maka dilakukan proses interpolasi linier. Lajur kolom harus mampu menahan persentase beban yang tercantum pada tabel berikut, yang mana persentase tersebut merupakan persentase dari momen negatif eksterior:

**Tabel 2.5 Persen momen terfaktor negatif eksterior**

$l_2/l_1$		0,5	1,0	2,0
$(\alpha l_2/l_1) = 0$	$\beta_t = 0$	100	100	100

	$\beta_t \geq 2,5$	75	75	75
$(\alpha l_2/l_1) \geq 1,0$	$\beta_t = 0$	100	100	100
	$\beta_t \geq 2,5$	90	75	45

Sumber: SNI 03-2847-2013

Lajur kolom harus mampu menahan persentase beban yang tercantum pada tabel berikut, yang mana persentase tersebut merupakan persentase dari momen positif terfaktor:

**Tabel 2.6 Persen momen terfaktor positif**

$l_2/l_1$	0,5	1,0	2,0
$(\alpha l_2/l_1) = 0$	60	60	60
$(\alpha l_2/l_1) \geq 1,0$	90	75	40

Sumber: SNI 03-2847-2013

Jika nilai input tidak tertera dalam tabel maka dilakukan proses interpolasi linier.

#### 2.4.3.4 Momen Terfaktor Lajur Tengah

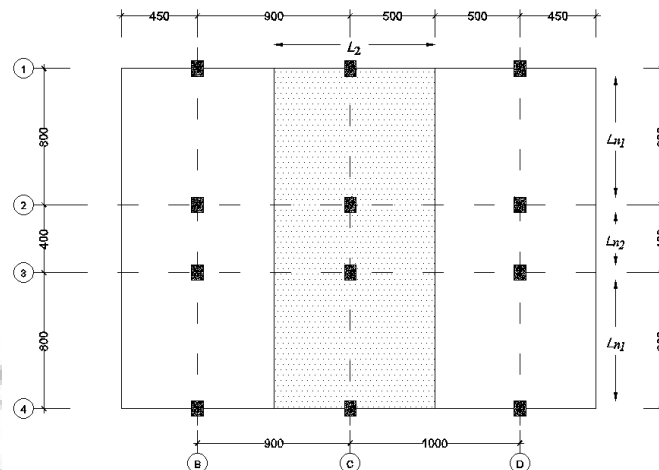
Bagian momen terfaktor negatif dan positif yang tidak ditahan oleh lajur kolom harus secara proporsional diberikan pada setengah lajur tengah yang berhubungan. Masing-masing lajur tengah harus mampu menahan nilai momen yang terdapat pada lajur tengah tersebut. Lajur tengah yang letaknya berdekatan dengan sisi tepi dan tertumpu dinding harus mampu menahan nilai momen sebesar dua kali dari nilai momen yang terdapat pada setengah lajur pada bagian tengah.

#### 2.4.4 Metode Portal Ekuivalen (*Equivalent Frame Method*)

Struktur dibagi menjadi portal (rangka, *frame*) menerus yang berpusat pada kolom dalam masing-masing arah yang saling tegak lurus. Masing-masing portal ini terdiri atas sederetan kolom dan *slab* lebar dengan balok, apabila ada, di antara garis pusat panel.

Berdasarkan statika, beban yang bekerja harus diperhitungkan untuk dua arah yang saling tegak lurus. Untuk memperhitungkan deformasi torsional balok tumpuan, dipakai kolom ekuivalen yang fleksibilitasnya merupakan jumlah

fleksibilitas kolom aktual dan fleksibilitas torsional balok transversal atau jalur *slab*. Ingat bahwa kekakuan merupakan kebalikan dari fleksibilitas.



**Gambar 2.11 Definisi metode rangka ekuivalen**

Metode portal ekuivalen dilakukan dengan membagi rangka portal ruang menjadi rangka-rangka bidang 2 dimensi, yang berpusat pada garis kolom atau garis as tumpuan. Rangka-rangka bidang yang dihasilkan selanjutnya dianalisis secara terpisah dalam arah memanjang dan arah melintang bangunan, serta dianalisis terpisah per lantai bangunan.

#### **2.4.4.1 Momen Inersia Balok-Pelat**

Dalam melakukan analisis rangka ekuivalen struktur balok-pelat, dibutuhkan variabel kekakuan dari masing-masing elemen struktur. SNI 2847-2013 dalam Pasal 13.7.3 menyatakan bahwa variasi momen inersia sepanjang sumbu balok-pelat harus diperhitungkan dalam analisis. Daerah kritis yang diperhitungkan untuk menentukan momen inersia balok-pelat diasumsikan terletak diantara sumbu kolom hingga muka kolom, konsol pendek, atau kepala kolom. Besaran momen inersia balok pelat tersebut adalah Inersia pelat-balok pada muka kolom, konsol pendek atau kepala kolom, dibagi dengan kuantitas  $(1 - c^2 / l^2)$ . Kuantitas  $c^2$  adalah lebar kolom, dan  $l^2$  adalah lebar balok-pelat, yang kesemuanya diukur dalam arah tegak lurus bentang yang ditinjau

#### 2.4.4.2 Momen Inersia Kolom

Pasal 13.7.4.3 SNI 2847:2013 menyatakan bahwa momen inersia kolom dari tepi atas hingga tepi bawah balok-pelat pada suatu sambungan balok kolom harus dianggap tak berhingga. Dengan perkataan lain:

$$\frac{1}{K_{ec}} = \frac{1}{\Sigma K_c} + \frac{1}{K_t} \dots\dots\dots (2.53)$$

Dimana:

$K_{ec}$  = Kekakuan lentur kolom ekuivalen; momen lentur per satuan rotasi

$\Sigma K_c$  = Jumlah kekakuan lentur kolom atas dan bawahnya; momen lentur persatuan rotasi

$K_t$  = kekakuan torsional balok transversal atau jalur *slab*; momen torsional persatuan rotasi

SNI 2847:2013 Pasal 13.7.7 menyatakan bahwa untuk kolom dalam, momen negatif terfaktor pada lajur kolom dan lajur tengah harus diambil pada muka kolom atau kepala kolom, sejarak tidak lebih dari  $0,175l_1$  dari sumbu kolom. Sedangkan pada kolom luar, momen negatif terfaktor diambil pada lokasi penampang yang terletak pada suatu jarak yang tidak lebih dari setengah proyeksi konsol pendek atau kepala kolom dihitung dari muka kolom penumpu

#### 2.4.5 Leleh Garis Metode (*Yield-Line Method*)

Pendekatan semielastik dapat digunakan untuk kasus standar dan memiliki faktor keamanan yang berlebihan pada kapasitasnya. Sebaliknya, metode garis leleh dapat digunakan dengan mudah untuk bentuk tidak beraturan dengan berbagai kondisi batas. Ketika persyaratan kemudahan servis terpenuhi, teori garis leleh Johansen adalah pendekatan yang paling sederhana untuk digunakan, dan itu dapat menunjukkan perilaku aktual dalam lempengan dan beton bertulang. Dengan cara ini momen lentur dapat diperoleh dari mekanisme keruntuhan yang diasumsikan yang merupakan fungsi dari beban luar dan bentuk panel lantai.

#### 2.4.6 Jalur Metode

Metode ini diusulkan oleh Hillerborg yang menganggap penguatan sebagai medan jalan. Karena praktis penguatan ditempatkan tegak lurus, Hillerborg menulis momen momen sama dengan nol dan mengubah pelat menjadi jalur pancaran, karenanya disebut "metode jalur".

Kecuali teori garis leleh Johansen, hampir semua solusi adalah batas bawah. Solusi batas atas Johansen dapat memberikan beban runtuhnya terbesar jika mekanisme kegagalan yang digunakan untuk memprediksi beban runtuh benar.

### 2.5 Metode Desain Flat Slab

#### 2.5.1 Menentukan Faktor Statis Momen Total ( $M_0$ )

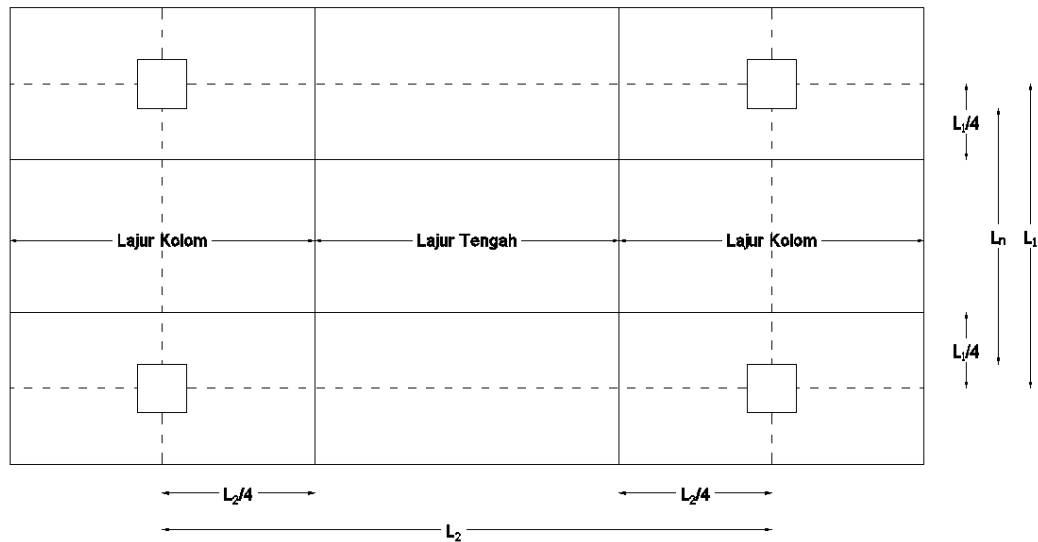
Nilai momen terfaktor yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$M_o = \frac{q_u l_n^2}{8} \dots\dots\dots (2.63)$$

Dimana  $l_n$  adalah bentang bersih dalam arah momen-momen tersebut ditentukan.

#### 2.5.2 Momen Positif dan Negatif pada Pelat

Dalam metode perencanaan langsung, total momen statis  $M_0$  dibagi kedalam momen positif dan momen negative sesuai dengan peraturan SNI 2013 .Bentang interior, 65% dari  $M_0$  adalah bagian dari momen negative dan 35% ke bagian momen positif.Ini kira- kira sama pada pembebanan merata, balok ujung jepit imana momen negative adalah dua pertiga  $wl^2/8$  dan momen positif adalah sepertiga.



**Gambar 2.12 Pembagian jalur kolom dan jalur tengah pelat**

Bentang eksterior ujung dianggap memiliki kekakuan yang kecil dibandingkan dengan tumpuan interior. Pembagian  $M_o$  adalah bentang ujung dibagi menjadi bagian momen positif dan negative. Mengacu pada pelat dimana tepi eksterior bersandar pada, tapi tidak menyatu pada, dinding bata, misalnya, sedangkan “tepi eksterior tertahan penuh” mengacu pada pelat dimana tepi eksterior ditumpu dengan dinding beton dengan kekakuan lentur yang sama atau lebih besar daripada kekakuan pelat.

Jika perhitungan momen negative pada dua sisi dengan tumpuan yang berbeda, maka potongan pelat momen negative paling besar dipakai untuk perencanaan, kecuali distribusi momen menghasilkan pembagian momen pada pertemuan sambungan pelat.

Pada bagian ujung bentang, nilai momen yang digunakan adalah sebagai berikut:

**Tabel 2.7 Pendistribusian momen statis**

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
	Tepi luar tak-terkekang	Slab dengan balok di antara semua tumpuan	Slab tanpa balok di antara tumpuan dalam		Tepi eksterior tekekang penuh
			Tanpa balok tepi	Balok tepi	
Momen terfaktor negatif dalam	0,75	0,70	0,70	0,70	0,65

Momen terfaktor positif	0,63	0,57	0,52	0,50	0,35
Momen terfaktor negatif luar	0	0,16	0,26	0,30	0,65

Sumber: SNI 2847:2013

### 2.5.3 Distribusi Momen Antara Jalur Tengah dan Jalur Kolom

Jalur yang sejajar kolom adalah jalur rencana dengan pada lebar masing – masing sisi kolom adalah bernilai 0,25 $l_2$  atau 0,25 $l_1$ . Pembagiannya adalah fungsi dari  $\alpha l_2/l_1$ , dimana tergantung pada aspek rasio dari panel ( $l_2/l_1$ ) dan kekakuan relative ( $\alpha_1$ ) dari balok (jika ada).

Untuk flatplate,  $\alpha l_2/l_1$  diambil sama dengan nol karena  $\alpha = 0$  jika tidak ada balok. Dalam kasus ini, 75% momen negative pada jalur kolom dan sisanya 25% dibagi merata antara dua batas setengah jalur tengah, 12.5 % masing – masing dan 60% momen positif pada jalur kolom dan sisanya 40% dibagi, dengan 20% pada tiap batas setengah jalur tengah.

#### a. Panel Interior

Untuk momen negative interior, jalur kolom harus menjadi bagian untuk menentang beberapa bagian dalam persen pada faktor momen negative interior dengan interpolasi linier dibuat untuk nilai yang sesuai.

**Tabel 2.8 Persentase momen rencana negatif interior yang ditahan oleh jalur kolom**

$l_2/l_1$	0,5	1,0	2,0
$(\alpha l_2/l_1) = 0$	75	75	75
$(\alpha l_2/l_1) \geq 1,0$	90	75	45

Sumber: SNI 2847-2013

$\alpha_1$  dalam tabel ini adalah  $\alpha$  dalam arah bentang  $l_1$  untuk kasus pelat dua arah pada balok dan sama ke rasio kekakuan lenturan pada penampang balok kekakuan lentur dengan lebar ke samping pelat oleh garis tengah yang berdekatan, jika ada, pada setiap balok  $\alpha l_1 = E_{cb}I_b / E_{cs}I_s$ , dimana  $E_{cb}$  dan  $E_{cs}$  adalah modulus elastis beton, dan  $I_s$  adalah momen inersia pada balok dan pelat, berturut – turut.

#### b. Panel Eksterior

Momen negatif eksterior, jalur kolom harus menjadi bagian untuk menentang beberapa bagian dalam persen faktor negative eksterior dengan



interpolasi linier yang dibuat untuk nilai yang sesuai, dimana  $\beta_t$  adalah rasio kekakuan torsi.  $\beta_t$  adalah rasio kekakuan torsi pada penampang tepi kolom ke kekakuan lenturan pada lebar pelat sama ke panjang bentang balok dari pusat tumpuan – tumpuan. Untuk momen positif, jalur kolom harus menjadi bagian untuk menentang beberapa bagian dalam persen pada faktor momen positif dengan interpolasi linier yang dibuat untuk nilai yang sesuai.

**Tabel 2.9 Persentase momen rencana negatif eksterior yang ditahan oleh jalur kolom**

$l_2/l_1$		0,5	1,0	2,0
$(\alpha l_2/l_1) = 0$	$\beta_t = 0$	100	100	100
	$\beta_t \geq 2,5$	75	75	75
$(\alpha l_2/l_1) \geq 1,0$	$\beta_t = 0$	100	100	100
	$\beta_t \geq 2,5$	90	75	45

Sumber: SNI 2847-2013

**Tabel 2.10 Persentase momen rencana positif yang ditahan oleh jalur kolom**

$l_2/l_1$	0,5	1,0	2,0
$(\alpha l_2/l_1) = 0$	60	60	60
$(\alpha l_2/l_1) \geq 1,0$	90	75	40

Sumber: SNI 2847-2013

Dalam pelat cendawan (flat slab) menerus, analisis dapat dilakukan dengan menentukan individual pelat dengan pelat lain yang berdekatan. Momen negatif pada pelat tepi menerus yang berdekatan dengan tumpuan interior dengan bentang tidak sama atau pembebanan tidak sama. Dengan momen negatif yang lebih besar dapat ditentukan jika tidak distribusi momen tak seimbang yang direncanakan dengan menyesuaikan penggabungan kekakuan bentang. Jika distribusi momen kecil, dampak-dampak akhir lainnya dapat diabaikan. Momen positif dimodifikasi untuk menghitung momen distribusi. Momen-momen ini dapat dimodifikasi samapi 10% sepanjang total desain momen pada panel dalam arah tidak berkurang.

Momen negatif pada pelat eksterior dan interior dan momen positif yang didistribusikan dalam jalur kolom dan jalur tengah sebagai berikut :

1. Tumpuan momen negatif eksterior dan interior didistribusikan sebagai berikut:
  - a) Tumpuan eksterior, jalur kolom akan menolak total momen negatif kecuali tumpuan eksterior Definisi kolom atau panjang dinding dengan panjang yang sama atau 0.75 kali bentang transversal, kemudian momen negatif dapat ditentukan dari distribusi beban terbagi rata melintang pada keseluruhan panjang jalur kolom dan tengah.
  - b) Tumpuan interior, momen negatif didistribusikan sebagai berikut :  
 Momen jalur kolom =  $0.75 M_{on}$   
 Momen jalur tengah =  $0.25 M_{on}$
2. Momen positif didistribusikan sebagai berikut :  
 Momen jalur kolom =  $0.6 M_{op}$   
 Momen jalur tengah =  $0.4 M_{op}$

Masing – masing jalur tengah didesain dengan jumlah momen yang diberikan ke dua setengah jalur tengah. Jalur tengah yang berdekatan dan parallel ke tumpuan tepi oleh dinding akan didesain dengan dua kali saat diberikan ke tengah palu yang merupakan bagian depan pertama kolom interior.

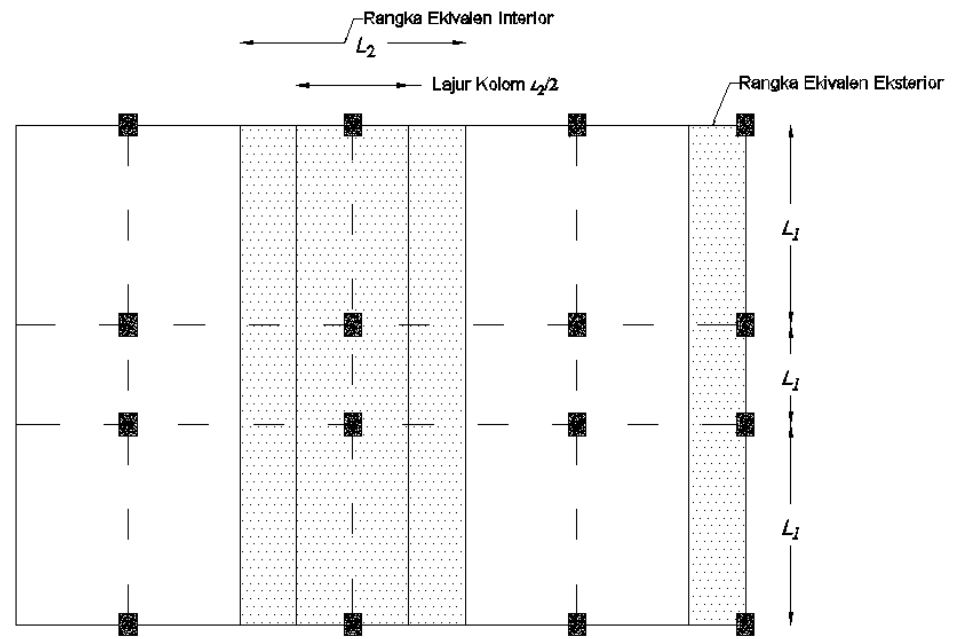
#### **2.5.4 Metode Portal Ekuivalen (Equivalent Frame Method)**

Untuk menganalisa beban horizontal, metode portal ekuivalen berbeda dari metode perencanaan langsung yang hanya dalam perhitungan momen-momen longitudinal sepanjang portal kaku ekuivalen. Pada metode perencanaan langsung hanya dapat digunakan apabila beban merata yang bekerja adalah seragam, dan jarak antar kolom penompang pelat seragam juga. Selain kondisi itu, maka metode perencanaan langsung tidak akan memberikan hasil yang memuaskan. Oleh karena itu sebagai alternatif untuk menentukan gaya-gaya dalam pada sistem struktur pelat, dapat digunakan metode portal ekuivalen.

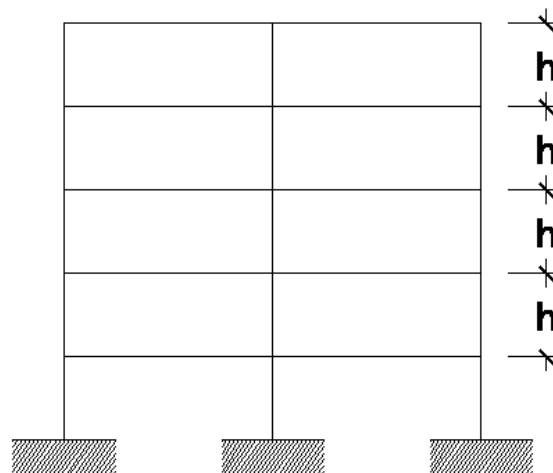
Analisis dengan menggunakan Metoda Portal Ekuivalen, dilakukan dengan batasan sebagai berikut :

1. Struktur harus dianggap terdiri dari frame setara pada garis kolom yang diambil dalam arah longitudinal dan transversal bangunan.
2. Setiap frame terdiri dari deretan kolom atau jalur pedestal dan balok-balok, terbatas pada arah lateral oleh diameter panel pada setiap sisi sumbu kolom atau tumpuan
3. Kolom atau alas dianggap terhubung ke jalur balok-balok oleh komponen tipping yang berorientasi transversal ke arah bentang, yang ditinjau kembali oleh momennya dan meluas ke garis tengah panel di setiap sisi kolom.
4. Bingkai berdekatan dan paralel terhadap tepi dibatasi oleh tepi dan diameter panel yang berdekatan.
5. Setiap frame yang setara dapat dianalisis secara keseluruhan; alternatifnya, untuk perhitungan karena beban gravitasi, setiap lantai dan atap dapat dianalisis secara terpisah dengan mengasumsikan bahwa ujung-ujung kolom terjepit.
6. Ketika pelat dianalisis secara terpisah, dalam menentukan momen pada tumpuan, dapat diasumsikan bahwa tumpuan jauh pada dua rentang berikutnya disematkan selama pelat balok terus melewati alas jepit.

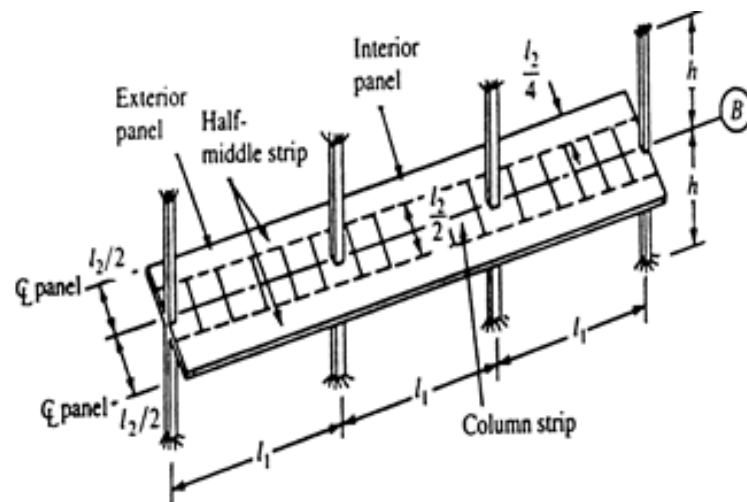
Besaran momen yang didapat, lalu dibagikan ke lajur kolom, lajur pada bagian tengah pelat dan balok dengan pembagian menggunakan metode desain langsung. Definisi dari portal ekuivalen ditunjukkan pada **Gambar 2.14(a)**, (b), dan (c) berikut :



Pelat lantai tipikal



Portal bangunan tipikal

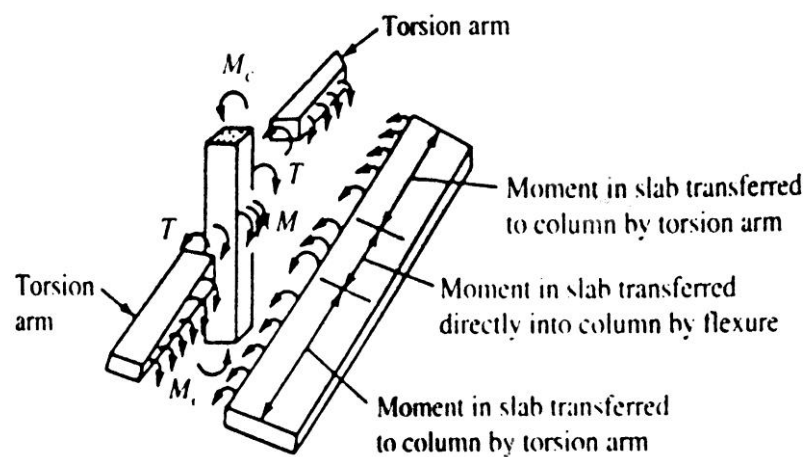


Rangka ekuivalen dalam (interior)

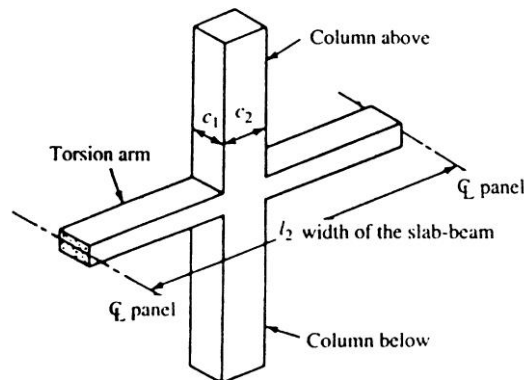
**Gambar 2.13 Definisi portal ekuivalen**

### 2.5.5 Kolom Ekuivalen

Kolom dianggap bergabung dengan lempeng melintang terhadap peregangannya di bawah aksi torsi. Pelat dan balok tersed terletak memanjang dari sumbu sumbu panel yang membatasi setiap sisi balok pelat yang sedang dikaji, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 di bawah ini:



Transfer momen antara pelat dan kolom



Kolom ekuivalen

**Gambar 2.14 Transfer momen pada pelat dan kolom ekuivalen**

Tindakan torsi pelat melintang akan mengurangi kekakuan lentur efektif kolom yang sebenarnya. Efek ini diperhitungkan dalam bentuk Kolom Setara yang memiliki kekakuan lentur lebih kecil dari kolom yang sebenarnya. Besarnya kekakuan lentur kolom ekuivalen dapat diberikan dengan rumus:

$$\frac{1}{K_{ek}} = \frac{1}{\sum K_k} + \frac{1}{K_t} \quad \dots\dots\dots (2.64)$$

Dimana :

$K_{ek}$  = kekakuan lentur kolom ekuivalen

$\sum K_k$  = jumlah kekakuan lentur kolom aktual dari kolom atas dan bawah pelat.

$K_t$  = kekakuan puntir dari penahan puntir (torsion arm)

Nilai kekakuan torsi  $K_t$  dapat ditentukan sebagai berikut :

$$K_t = \sum \frac{9 \cdot E_{bp} \cdot C}{l_2 \cdot \left(1 - \frac{c_2}{l_2}\right)^3} \quad \dots\dots\dots (2.65)$$

Dimana :

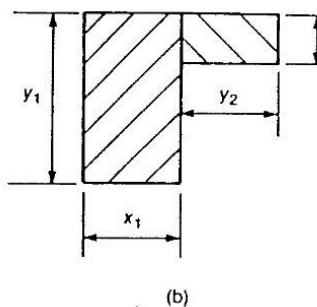
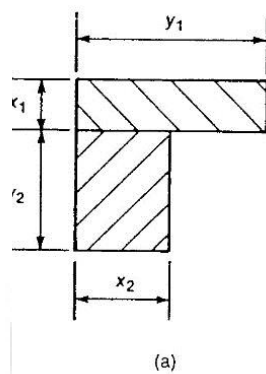
$E_{bp}$  = Modulus elastisitas balok pelat.

$C_2$  = ukuran kolom, kepala kolom dalam arah  $l_2$

$L_2$  = lebar dari balok-pelat yang ditinjau.

$C$  = konstanta penampang untuk menentukan kekakuan puntir, ditentukan sebagai berikut :

$$C = \sum \left( 1 - 0,63 \cdot \frac{x}{y} \right) \cdot \frac{x^3 \cdot y}{3} \dots\dots\dots (2.66)$$



$x$  : dimensi keseluruhan yang lebih pendek dari bagian persegi suatu penampang, mm  
 $y$  : dimensi keseluruhan yang lebih panjang dari bagian persegi suatu penampang, mm

Jika terdapat balok sepanjang garis kolom, nilai  $K_t$  harus dikalikan dengan faktor  $I_{bp}/I_p$ , sebagai berikut :

$$\frac{1}{K_{ek}} = \frac{1}{\sum K_k} + \frac{1}{K_t \left( \frac{I_{bp}}{I_p} \right)} \dots\dots\dots (2.67)$$

Dimana :

$I_{bp}$  = momen inersia balok pelat

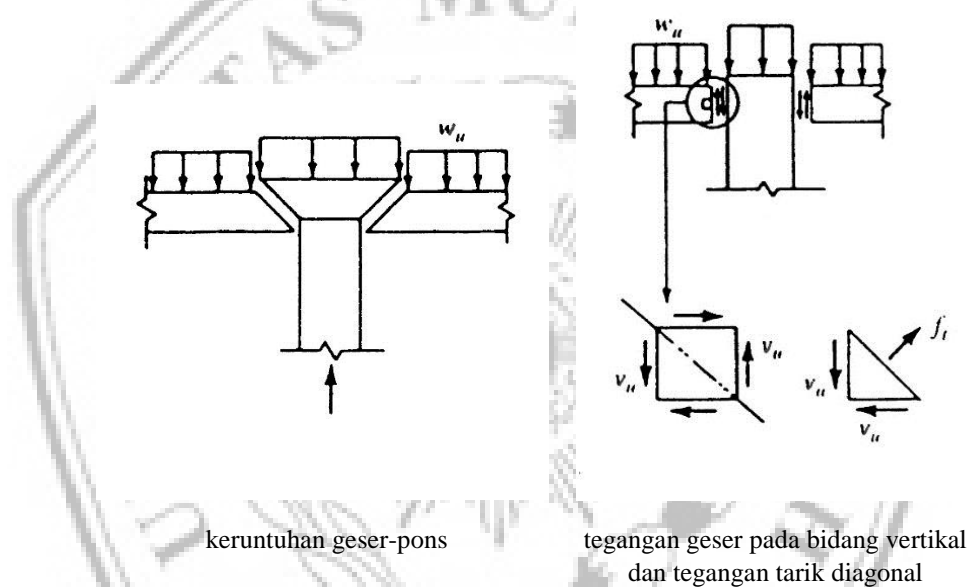
$I_p$  = momen inersia pelat dari balok-pelat yang ditinjau

## 2.5.6 Transfer Beban Lantai ke Kolom

Gaya maksimum yang bekerja pada pelat dua arah harus mampu menahan kekuatan pelat dan kolom pertemuan. Meskipun pelat mampu membawa beban yang disebabkan oleh momen kerja eksternal, itu tidak mungkin untuk menahan gaya geser kerja. Jika pelat cukup untuk digunakan, luasnya kecil dan tingkat pekerjaan di daerah itu cukup besar.

Dalam kondisi tertentu, momen juga harus dipindahkan dari pelat ke kolom. Momen lempar ini juga akan menyebabkan gaya geser dan sejajar dengan gaya geser yang diinduksi oleh beban vertikal. Tegangan ini menjadi sangat besar di kolom luar (kolom eksterior), di mana momen bekerja hanya pada satu sisi.

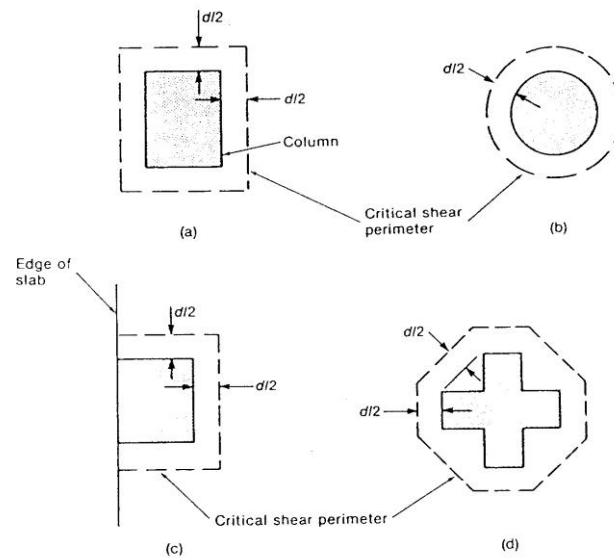
Memindahkan beban pelat tanpa balok, Tegangan vertikal pelat dilewatkan dalam bentuk unit geser ke kolom. Pelajaran akan digunakan untuk menggarisbawahi fungsi geser dari beton, dan juga akan menyebabkan retakan dengan momen yang terjadi di pedestal (kolom). Gambar 2.15 memperlihatkan:



**Gambar 2.15 Transfer beban vertikal dari pelat lantai ke kolom**

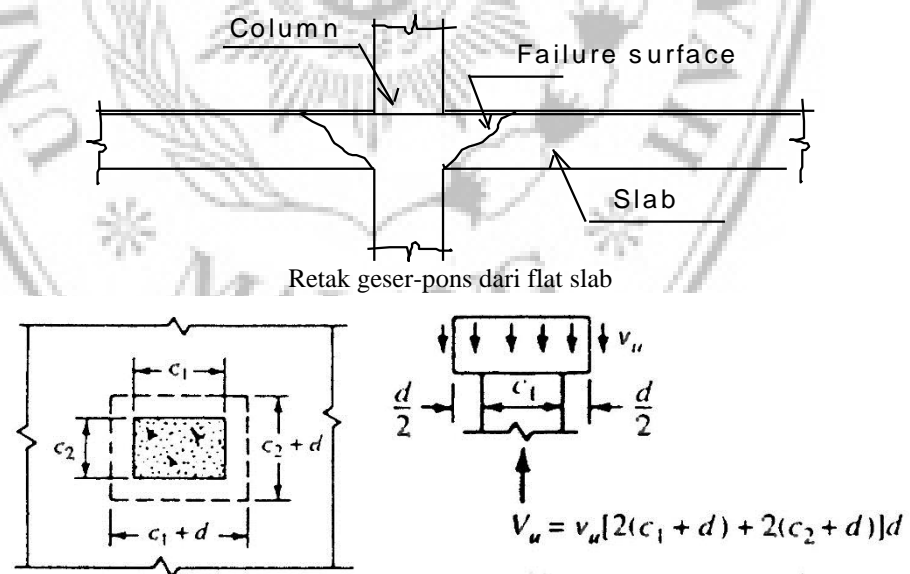
Gambar 2.16 menampilkan sejumlah penampang kritis geser dua arah dari beberapa bentuk kolom.





**Gambar 2.16 Penampang geser dua arah dari beberapa kolom**

Gambar 2.17 penampang kritis dan fokus geser yang terjadi dalam keruntuhan shear-punch untuk penampang persegi panjang.



penampang atas tegangan

geser pada penampang yang kritis

**Gambar 2.17 Penampang keruntuhan yang mengalami geser-pons**

Besarnya kapasitas geser beton pada keruntuhan geser-pons, ditentukan dari nilai minimum dari rumus berikut:

$$V_c = \left(1 + \frac{2}{\beta_c}\right) \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \dots\dots\dots (2.68)$$

$$V_c = \left(\frac{\alpha_s \cdot d}{b_0} + 2\right) \cdot \frac{\sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d}{12} \quad \dots\dots\dots (2.69)$$

$$V_c = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d \quad \dots\dots\dots (2.70)$$

Dimana :

$d$  = tinggi efektif pelat lantai

$B_0$  = keliling dari penampang kritis

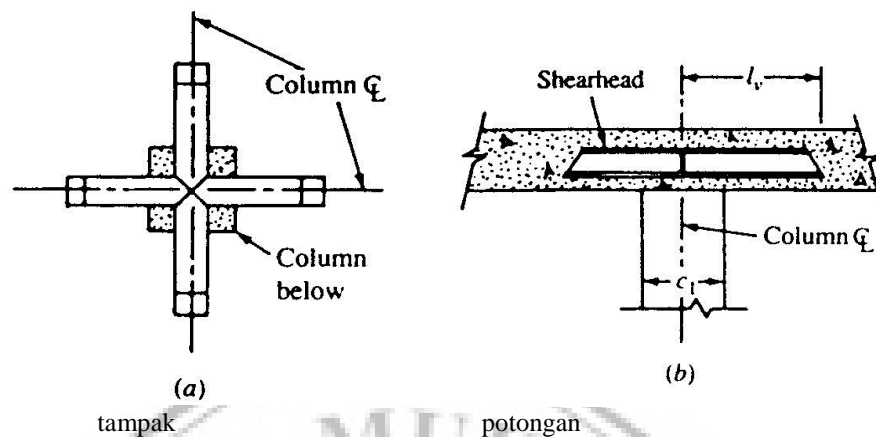
$\beta_c$  = rasio dari sisi panjang terhadap sisi pendek dari kolom

Untuk  $\beta_c < 2$ , untuk kolom dalam :  $V_c = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_0 \cdot d$

$\alpha_s$  = 40 untuk kolom dalam, 30 untuk kolom pinggir dan 20 untuk kolom sudut, dimana kata-kata dalam, pinggir dan sudut berhubungan dengan sisi dari penampang kritis.

### 2.5.7 Perkuatan dengan *Shearhead (Shearhead Reinforcement)*

Dalam konstruksi flat-slab, transfer beban ke kolom ditentukan oleh tegangan geser karena area kontak terbatas dari kolom cross-sectional dengan pelat. Area kontak kecil yang digunakan oleh pelat maksimum dan dimensi minimum, akan menyebabkan tekanan kerja yang sangat besar dengan pola geser slide-pound.



**Gambar 2.18 Perkuatandengan shearhead**

Untuk mengatasi hal ini, hal ini dilakukan dengan memperbesar dari sudut geser, dengan memasang tulangan geser (Gambar 2.19). Shearheads adalah bala bantuan khusus untuk meningkatkan beban secara vertikal yang dapat dilewati dari plat ke kolom.

Shearheads adalah elemen tambahan, terbuat dari batang baja seperti balok C atau I yang kaku, dan berada di atas kolom penampang lintang. Shearheads digunakan untuk memperbesar area geser, di mana gaya geser disalurkan ke kolom dengan pelat lantai sekitarnya.

## 2.6 Kolom

Menurut Soedarmoko (1996), kolom adalah bentang tekan vertikal dari rangka (*frame*) struktur yang memikul beban dari balok. Kolom meneruskan beban dari elevasi atas ke elevasi yang lebih bawah hingga akhirnya sampai ke tanah melalui pondasi. Kolom yang langsung menerima beban dari pelat tanpa adanya balok harus direncanakan dimensi yang besar agar dapat menahan beban vertikal maupun horizontal dengan aman.

Menurut Agus Setiawan (2016), kolom adalah salah satu komponen struktur vertikal yang secara khusus difungsikan untuk memikul rasio tinggi/panjang terhadap dimensi terkecilnya sebesar 3 atau lebih. Kolom memikul beban vertikal yang berasal dari pelat lantai atau atap dan menyalurkannya ke pondasi.

SNI 2847-2013 menjelaskan bahwa kolom harus digunakan untuk meningkatkan kinerja beban yang berfokus pada atap atau lantai dan momen maksimum beban pengenal pada satu rentang dengan lantai atau atap yang berdekatan ditinjau. Kondisi pemuatan yang menghasilkan momen penting pada beban aksial juga ditinjau.

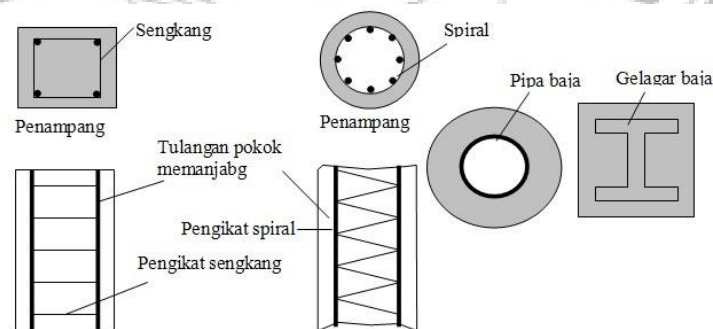
Dalam rangka atau konstruksi biasa, peninjauan harus diberikan di lantai dan interior dan dari pemuatan eksentrik lainnya. Dalam menghitung waktu yang tepat di kolom, adalah mungkin untuk mencapai ujung dari kolom yang dibangun bersama dengan struktur sebagai penjepit..

### 2.6.1 Jenis Kolom

Secara umum kolom dapat dikelompokkan menjadi kategori-kategori berikut:

1. Berdasarkan beban yang bekerja kolom dapat diklasifikasikan menjadi:
  - a. *Kolom dengan beban aksial*. Beban kolom dianggap bekerja melalui pusat penampang kolom.
  - b. *Kolom dengan beban eksentris*. Beban kolom dianggap bekerja sejauh  $e$  dari pusat penampang kolom.
  - c. *Kolom dengan beban biaksial*. Beban bekerja pada sembarang titik pada penampang kolom, sehingga menimbulkan momen terhadap sumbu  $x$  dan  $y$  secara simultan.
2. Berdasarkan panjangnya, kolom dapat dibedakan menjadi:
  - a. *Kolom pendek*, yaitu jenis kolom yang keruntuhannya diakibatkan oleh hancurnya beton atau luluhnya tulangan baja di bawah kapasitas ultimit dari kolom tersebut.
  - b. *Kolom panjang*, jenis kolom yang dalam perencanaannya harus memperhitungkan rasio kelangsingan dan efek tekuk, sehingga kapasitasnya berkurang dibandingkan dengan kolom pendek.
3. Berdasarkan bentuk penampangnya kolom dapat berbentuk bujur sangkar, persegi panjang, lingkaran, bentuk L, segi delapan, atau bentuk lainnya dengan ukuran sisi yang mencukupi.

4. Berdasarkan jenis tulangan sengkang yang digunakan:
  - a. Kolom dengan sengkang persegi (dapat juga ditambahkan sengkang ikat/kait) yang mengikat tulangan memanjang/vertikal dari kolom, dan disusun dengan jarak tertentu sepanjang tinggi kolom.
  - b. Kolom dengan sengkang spiral untuk mengikat tulangan memanjang dan meningkatkan daktilitas kolom. Secara umum tulangan sengkang pada kolom, baik sengkang persegi maupun spiral berfungsi mencegah tekuk pada tulangan memanjang dan mencegah pecahnya selimut beton akibat beban tekan yang besar.
5. Berdasarkan kekangan dalam arah lateral, kolom dapat menjadi bagian dari suatu portal yang dikekang terhadap goyangan ataupun juga dapat menjadi bagian dari suatu portal bergoyang. Kekangan terhadap goyangan ataupun juga dapat menjadi bagian dari suatu portal bergoyang. Kekangan dalam arah lateral untuk struktur beton dapat diberikan oleh dinding geser (*shear wall*). Pada portal tak bergoyang, kolom memikul seluruh beban gravitasi dan beban lateral.
6. Berdasarkan materialnya, kolom dapat berupa beton bertulang biasa, kolom beton prategang, atau kolom komposit (terdiri dari beton dan profil baja). Kolom beton bertulang dengan tulangan memanjang berupa tulangan baja merupakan bentuk kolom yang paling umum dijumpai pada struktur bangunan gedung.

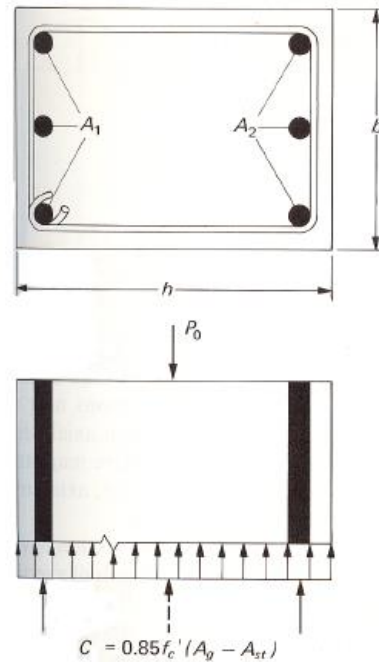


Gambar 2.19 Jenis-jenis kolom

### 2.6.2 Kolom Pendek Eksentrisitas Kecil

Menurut Nawi (1990), apabila kolom runtuh dengan kegagalan materialnya, yaitu lelehnya baja atau hancurnya beton, maka kolom digolongkan sebagai kolom

pendek. Apabila kolom beton bertulang pendek hanya dibebani gaya aksial secara konsentrik, maka kolom akan memberikan perlawanan (kolom mempunyai kekuatan) dalam 2 komponen, yakni:



Gambar 2.20 Gaya aksial konsentrik pada kolom

$$1. \text{ Sumbangan beton : } C_c = 0,85f'_c(A_g - A_{st}) \quad \dots\dots\dots (2.71)$$

Dimana:  $A_g$  = luas penampang kolom total (termasuk luas penampang tulangan)

$A_{st}$  = Luas total penampang tulangan

Penggunaan angka 0,85 pada kekuatan kolom dari sumbangan beton didasari atas adanya perbedaan kuat tekan beton pada elemen struktur aktual terhadap kuat tekan beton silinder  $f'_c$ .

$$2. \text{ Sumbangan baja : } T_s = f_y A_{st} \quad \dots\dots\dots (2.72)$$

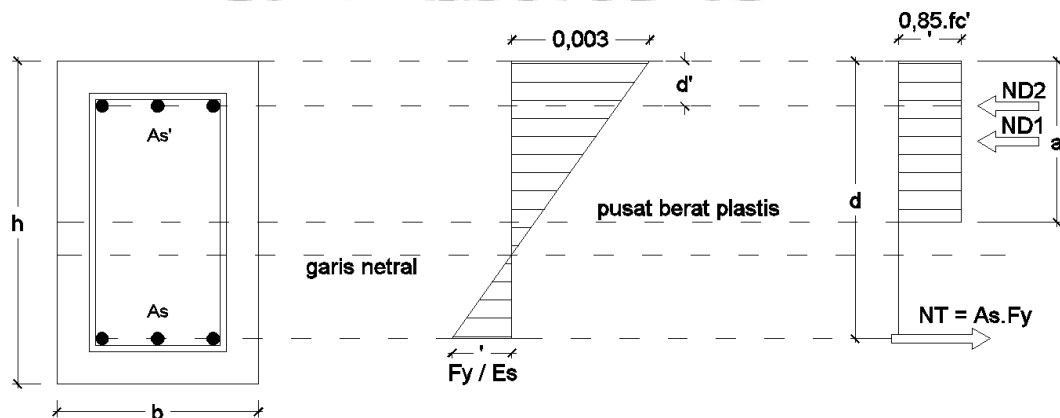
Sehingga kekuatan nominal total kolom pendek yang dibebani secara aksial adalah:

$$P_n = P_o = C_c + T_s = 0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad \dots\dots\dots (2.73)$$

Pada kenyataan di lapangan cukup sulit dipastikan bahwa gaya aksial yang bekerja pada kolom betul-betul konsentrik. Sehingga dalam perencanaan perlu diperhitungkan eksentrisitas minimum.

Eksentrisitas minimum tersebut harus diambil minimal:

- 0,1 lebar kolom untuk kolom dengan tulangan pengikat sengkang.
- 0,05 lebar kolom untuk kolom dengan tulangan pengikat spiral



**Gambar 2.21 Keadaan seimbang regangan – kolom persegi**

Perhitungan eksentrisitas minimum dapat dihindari (boleh tidak dilakukan) bila kekuatan penampang  $P_o$  direduksi sebesar 15% untuk kolom dengan pengikat spiral dan 20% untuk kolom dengan pengikat sengkang. Sehingga kekuatan nominal penampang kolom setelah direduksi untuk antisipasi eksentrisitas minimum menjadi (SNI 2847:2013 pasal 10.3.6.1 dan pasal 10.3.6.2):

1. Untuk kolom dengan tulangan spiral:

$$\phi P_n (maks) = 0,85 \phi [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad \dots\dots\dots (2.74)$$

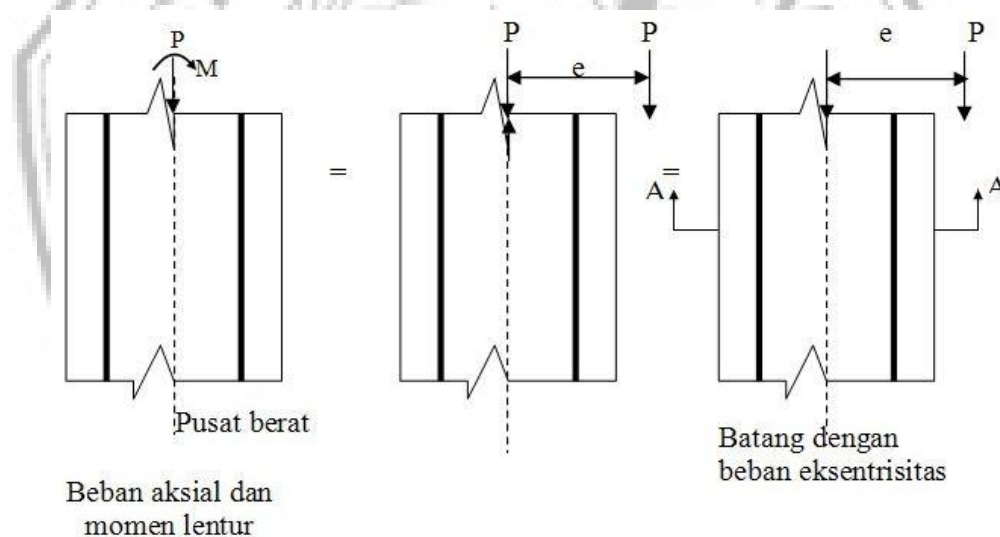
2. Untuk kolom dengan tulangan sengkang pengikat:

$$\phi P_n (maks) = 0,80 \phi [0,85 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad \dots\dots\dots (2.75)$$

Pasal 9.3.2.2 pada SNI 2847:2013 memberikan batasan untuk faktor reduksi kekuatan,  $\phi$ , yaitu sebesar 0,65 untuk sengkang persegi dan  $\phi=0,75$  untuk sengkang spiral.

### 2.6.3 Kolom Pendek Eksentrisitas Besar

Saat penampang kolom diberi beban tekan eksentris dengan eksentrisitas yang besar, maka akan terjadi keruntuhan tarik. Kolom akan mengalami keruntuhan akibat luluhnya tulangan baja dan hancurnya beton pada saat regangan tulangan baja melampaui  $\varepsilon_y = f_y / E_s$ . Dalam kasus ini kuat tekan nominal penampang,  $P_n$  akan lebih kecil dari  $P_b$ , atau eksentrisitas,  $e = M_n / P_n$  lebih besar dari eksentrisitas pada kondisi seimbang,  $e_b$ .



Gambar 2.22 Ilustrasi kolom bereksentrisitas

Keseimbangan gaya-gaya,  $\sum H = 0$ , pada penampang kolom pendek dengan beban aksial eksentrisitas besar adalah sebagai berikut:

$$P_n = N_{D1} + N_{D2} - N_T \quad \dots\dots\dots (2.76)$$

$$P_n = 0,85 f'_c ab + A'_s f'_s - A_s f_s \quad \dots\dots\dots (2.77)$$

Apabila tulangan tekan dan tarik simetris,  $A_s = A'_s$ , maka:



$$P_n = 0,85 f'_c ab \quad \dots\dots\dots (2.78)$$

Nilai keseimbangan momen terhadap titik berat geometris dimana jarak  $e$  ditentukan, menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$M_n = P_n e \quad \dots\dots\dots (2.79)$$

$$P_n e = 0,85 f'_c ab \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y \left( \frac{h}{2} - d' \right) + A_s f_y \left( d - \frac{h}{2} \right) \quad \dots\dots\dots (2.80)$$

$$P_n e = 0,85 f'_c ab \left( \frac{h}{2} - \frac{a}{2} \right) + A_s f_y (d - d') \quad \dots\dots\dots (2.81)$$

Dengan melakukan substitusi nilai  $P_n$  n didapatkan persamaan:

$$P_n e = P_n \left( \frac{h}{2} - \frac{P_n}{1,70 f'_c b} \right) + A_s f_y (d - d') \quad \dots\dots\dots (2.82)$$

$$\frac{(P_n)^2}{1,70 f'_c b} - P_n \left( \frac{h}{2} - e \right) - A_s f_y (d - d') = 0 \quad \dots\dots\dots (2.83)$$

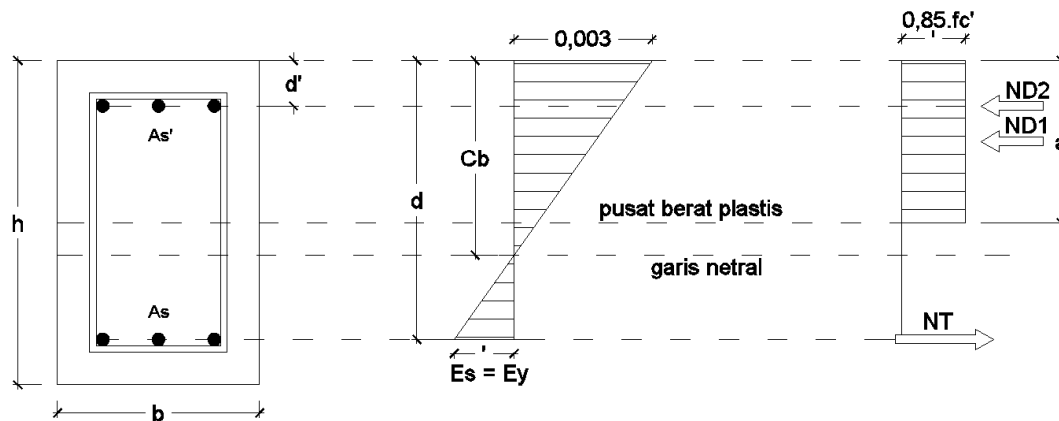
Dari persamaan 2.82 dan 2.83 didapat persamaan untuk  $P_n$  sebagai berikut:

$$P_n = 0,85 f'_c b \left[ \left( \frac{h}{2} - e \right) + \sqrt{\left( \frac{h}{2} - e \right)^2 + \frac{2 A_s f_y (d - d')}{0,85 f'_c b}} \right] \quad \dots\dots\dots (2.84)$$

Jika nilai  $m = \frac{f_y}{0,85 f'_c b}$  dan  $\rho = \rho' = \frac{A_s}{bd}$ , maka nilai  $P_n$  dapat disusun

ulang, dan diperoleh nilai berikut:

$$P_n = 0,85 f'_c b d \left[ \left( \frac{h - 2e}{2d} \right) + \sqrt{\left( \frac{h - 2e}{2d} \right)^2 + 2m\rho \left( 1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \quad \dots\dots\dots (2.85)$$



Gambar 2.23 Regangan kolom eksentrisitas besar

Proses perhitungan akan lebih mudah jika keseimbangan momen diperhitungkan terhadap titik berat tulangan tarik. Maka eksentrisitas diperhitungkan sebagai berikut:

$$e' = \left[ e + \left( d - \frac{h}{2} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.86)$$

$$\frac{h - 2e}{2d} = 1 - \frac{e'}{d} \quad \dots\dots\dots (2.87)$$

$$P_n = 0,85 f_c' b d \left[ \left( 1 - \frac{e'}{d} \right) + \sqrt{\left( 1 - \frac{e'}{d} \right)^2 + 2m\rho \left( 1 - \frac{d'}{d} \right)} \right] \quad \dots\dots\dots (2.88)$$

#### 2.6.4 Kolom Panjang

Perbedaan mendasar antara kolom panjang dan kolom pendek adalah kolom panjang nilai kegagalannya ditentukan oleh beberapa faktor seperti tekuk (*buckling*), perpendekan elastis, kemungkinan timbulnya momen sekunder akibat deformasi lateral, tinggi/panjang kolom, ukuran penampang, rasio kelangsingan, dan kondisi tumpuan ujung. Menurut SNI (2013), peraturan tidak memberikan definisi batas panjang maksimum kolom pendek, tetapi menentukan kegunaan dari proses evaluasi kelangsingan pada batas nilai rasio kejenuhan tertentu.

#### 2.6.4.1 Batasan Rasio Kelangsingan ( $kl_u/r$ )

Batasan antara kolom pendek dan kolom panjang sangat ditentukan oleh rasio kelangsingannya. Batasan tersebut diberikan dalam SNI yang menyatakan bahwa efek tingkat langsing dapat dibatalkan jika terjadi:

1. Untuk komponen struktur kompresi yang tidak tercampur untuk goyangan lateral

$$\frac{k l_u}{r} \leq \frac{44}{1} \dots\dots\dots (2.89)$$

2. Untuk komponen struktural dikompresi nongol terhadap goyangan lateral (Elemen struktur tekan tak bergoyang).

$$\frac{k l_u}{r} \leq 34 - 12 \left[ \frac{M_1}{M_2} \right] \leq 40 \dots\dots\dots (2.90)$$

Dimana:

K = Faktor panjang efektif kolom

$l_u$  = Panjang kolom yang ditopang

r = Jari-jari potongan lintang kolom =  $\sqrt{I/A}$

Dimana  $M_1$  dan  $M_2$  adalah momen ujung terfaktor pada kolom, dengan  $M_2 > M_1$ . Rasio  $M_1/M_2$  bernilai positif apabila terjadi kelengkungan tunggal, dan bernilai negatif apabila terjadi kelengkungan ganda.

#### 2.6.4.2 Panjang Efektif Kolom

Panjang efektif kolom merupakan fungsi dari dua buah faktor utama, yaitu:

1. Panjang tak terkekang,  $l_u$ , merupakan tinggi tak terkekang kolom antara dua lantai tingkat. Nilai ini diukur dari jarak bersih antar pelat lantai, balok, ataupun elemen struktur lain yang memberikan kekangan lateral pada kolom, pada sistem

*flat slab* dengan kepala kolom panjang  $I_u$  dihitung dari sisi atas pelat pada bagian bawah kolom hingga ke sisi bawah kepala kolom di atasnya.

2. Faktor panjang efektif,  $k$ . Merupakan rasio antara jarak dua titik dengan momen nol terhadap panjang tak terkekang dari elemen kolom tersebut. Kolom dengan tumpuan kedua ujung berupa sendi, dengan panjang tak terkekang sebesar  $I_u$ , dan jarak antara dua titik yang memiliki momen sama dengan nol adalah  $I_u$ , memiliki faktor panjang efektif,  $k = l_u / I_u = 1,0$ . Jika kedua tumpuan ujung adalah jepit, momen nol terjadi pada jarak  $l_u/4$  dari kedua tumpuan, sehingga  $k = 0,5 I_u / I_u = 0,5$ . Nilai  $k$  dapat ditentukan pula dengan menggunakan nomogram dengan terlebih dahulu menghitung faktor tahanan ujung  $\psi_A$  dan  $\psi_B$  pada sisi atas dan bawah dari kolom.

$$\psi = \frac{\sum EI/l_c \text{ kolom}}{\sum EI/l_c \text{ balok}} \dots\dots\dots (2.91)$$

Dalam perhitungan nilai  $\psi$  tersebut, dibutuhkan besaran jari-jari girasi penampang yang nilainya sangat ditentukan oleh modulus elastisitas dan momen inersia penampang. Untuk modulus elastisitas beton bertulang dapat diambil menggunakan persamaan empiris:

$$E_c = 0,043 \cdot w^{1,5} \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.92)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \dots\dots\dots (2.93)$$

Nilai momen inersia penampang dapat direduksi seperti dicantumkan dalam peraturan SNI 2847:2013 pasal 10.10.4.1, sebagai berikut:

Elemen struktur tekan:

Kolom  $I = 0,70I_g$

Dinding Geser (tidak retak)  $I = 0,70I_g$

Dinding Geser (retak)  $I = 0,35I_g$

Elemen struktur lentur:

Balok	$I = 0,35I_g$
-------	---------------

Pelat datar dan slab datar	$I = 0,25I_g$
----------------------------	---------------

Dengan  $I_g$  adalah momen inersia bruto dari penampang. Atau, momen inersia untuk elemen struktural tekan dan lentur dapat dihitung dengan rumus berikut:

Untuk elemen struktural tekan:

$$I = \left( 0,80 + 25 \frac{A_{st}}{A_g} \right) \left( 1 - \frac{M_u}{P_u h} - 0,5 \frac{P_u}{P_0} \right) I_g \leq 0,875 I_g \quad \dots\dots\dots (2.94)$$

Dengan  $P_u$  dan  $M_u$  diperoleh dari kombinasi beban yang ditinjau, atau dari kombinasi  $P_u$  dan  $M_u$  yang menghasilkan nilai terkecil untuk  $I$ . Nilai  $I$  sendiri tidak perlu diambil lebih kecil dari  $0,35I_g$ .

Untuk elemen struktural lentur:

$$I = \left( 0,10 + 25 \rho \right) \left( 1,2 - 0,2 \frac{b_w}{d} \right) I_g \leq 0,5 I_g \quad \dots\dots\dots (2.95)$$